



Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston)

Würenlingen, August 2005

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	7
1.1	Entsorgung der radioaktiven Abfälle	7
1.2	Forderung des Entsorgungsnachweises	9
1.3	Eingereichtes Projekt und Anträge der Nagra	11
1.4	Behördliche Überprüfung	12
1.5	Ziel und Gliederung des Gutachtens.....	13
2	Standortnachweis	15
2.1	Beurteilungsgrundlagen	15
2.2	Geologie des Zürcher Weinlands	16
2.2.1	Geologisch-tektonischer Überblick	16
2.2.2	Schichtfolge im Untersuchungsgebiet	20
2.2.3	Lithologie des Opalinustons	22
2.2.4	Temperaturgeschichte des Opalinustons	24
2.2.5	Lithologie der Rahmengesteine.....	25
2.3	Tektonische Strukturen im Untersuchungsgebiet	27
2.3.1	Regionaler struktureller Aufbau.....	27
2.3.2	Lokales Störungsmuster	29
2.3.3	Deformation des Wirtgesteinskörpers	33
2.4	Hydrogeologie.....	35
2.4.1	Durchlässigkeitsverhältnisse und hydrogeologische Gliederung	35
2.4.2	Potenzialverteilung und Fliessverhältnisse in den Aquiferen	41
2.4.3	Hydrochemie und Verweilzeiten der Tiefengrundwässer.....	43
2.4.4	Wasserfluss durch das Endlager.....	50
2.4.5	Zusammenfassende Beurteilung zur Hydrogeologie	55
2.5	Langzeitentwicklung	56
2.5.1	Grundlagen der Langzeitanalysen	56
2.5.2	Hebungen und Hebungsraten	57
2.5.2.1	Geodynamische Grundlagen.....	57
2.5.2.2	Geomorphologische Beobachtungen	58
2.5.2.3	Geodätische Messungen.....	60
2.5.2.4	Beckenmodellierungen.....	61

2.5.3	Abtrag und Erosion	62
2.5.3.1	Flächenhafter Materialabtrag: Denudation.....	63
2.5.3.2	Flusserosion.....	63
2.5.3.3	Glaziale Tiefenerosion.....	66
2.5.4	Entwicklung des lokalen Reliefs im Zürcher Weinland.....	69
2.5.5	Neotektonik und Erdbeben.....	70
2.5.5.1	Spannungsfeld	71
2.5.5.2	Seismizität.....	72
2.5.5.3	Auswirkungen von Erdbeben auf die Untertagebauten.....	73
2.5.5.4	Auswirkungen von Erdbeben auf den Grundwasserfluss.....	75
2.6	Geothermie und Rohstoffe	76
2.6.1	Nutzungskonflikte mit geothermischen Projekten	76
2.6.2	Nutzungskonflikte mit Rohstoffen.....	77
2.7	Beurteilung des Standortnachweises	79
3	Machbarkeitsnachweis	82
3.1	Beurteilungsgrundlagen	82
3.2	Bautechnisches Projekt	82
3.3	Betrieb des Lagers.....	90
3.4	Rückholbarkeit der Abfälle	93
3.5	Überwachung und Verschluss des Lagers	94
3.6	Beurteilung des Machbarkeitsnachweises	97
4	Sicherheitsnachweis.....	99
4.1	Beurteilungsgrundlagen	99
4.2	Sicherheitskonzept	101
4.3	Methodik des Sicherheitsnachweises	107
4.4	Abfallinventar	113
4.4.1	Abfälle im BE/HAA-Lager	113
4.4.2	Abfälle im LMA-Lager.....	117
4.5	Technische Barrieren im BE/HAA-Lager	119
4.5.1	Abfallmatrizen	119
4.5.1.1	Abgebrannte Brennelemente.....	119
4.5.1.2	Verglaste hochaktive Abfälle	126
4.5.1.3	Beitrag der Abfallmatrizen zur Sicherheit.....	129

4.5.2	Abfallbehälter	129
4.5.2.1	Behälterauslegung und -herstellung	129
4.5.2.2	Korrosion von Eisenbehältern	131
4.5.2.3	Korrosion von Kupferbehältern	137
4.5.2.4	Beitrag der Behälter zur Sicherheit.....	137
4.5.3	Bentonitverfüllung	138
4.5.3.1	Generelle Eigenschaften	138
4.5.3.2	Temperaturbedingungen	142
4.5.3.3	Aufsättigung und Quellverhalten.....	148
4.5.3.4	Gastransport durch die Bentonitverfüllung.....	152
4.5.3.5	Tragfähigkeit	154
4.5.3.6	Chemische Bedingungen	156
4.5.3.7	Löslichkeiten der Radionuklide	159
4.5.3.8	Sorptionskoeffizienten der Radionuklide.....	164
4.5.3.9	Diffusionskoeffizienten	170
4.5.3.10	Beitrag der Bentonitverfüllung zur Sicherheit.....	171
4.6	Technische Barrieren im LMA- Lager.....	173
4.6.1	Abfallmatrizen, Abfallbehälter und Lagercontainer	173
4.6.2	Zementverfüllung der LMA-Lagertunnel	174
4.6.3	Auswirkungen organischer Stoffe.....	175
4.6.4	Chemische Bedingungen	178
4.6.5	Löslichkeiten der Radionuklide.....	181
4.6.6	Sorptionskoeffizienten der Radionuklide	184
4.6.7	Auswirkungen der Gasproduktion	188
4.7	Die natürliche Barriere Wirtgestein.....	191
4.7.1	Mechanismen der Radionuklidausbreitung.....	192
4.7.2	Geochemische Bedingungen	193
4.7.3	Sorptionskoeffizienten der Radionuklide	196
4.7.4	Diffusionskoeffizienten	200
4.7.5	Gastransport im Wirtgestein.....	202
4.7.6	Barrierenwirkung des Wirtgesteins.....	207
4.7.7	Barrierenwirkung der Rahmengesteine	207
4.8	Das Mehrfachbarrierensystem	209

4.8.1	Charakteristiken eines Mehrfachbarrierensystems	210
4.8.2	Wirkung der einzelnen Barrieren	210
4.8.3	Zusammenwirken und Verträglichkeit der Barrieren	213
4.8.4	Einfluss des Zementporenwassers auf den Opalinuston	215
4.8.5	Beurteilung des Mehrfachbarrierensystems	216
4.9	Biosphäre und Expositionspfade	217
4.9.1	Die Referenz-Biosphäre	217
4.9.2	Alternative Biosphärenmodelle	219
4.10	Szenarienanalyse	221
4.10.1	Hinweise zur Szenarienanalyse	221
4.10.2	FEP-Analyse	222
4.10.3	Festlegung der Szenarien	224
4.11	Radiologische Auswirkungen	232
4.11.1	Konzeptuelle Annahmen	232
4.11.2	Beschreibung des Referenzfalls	234
4.11.3	Resultate des Referenzfalls	237
4.11.4	Weitere Rechenfälle	238
4.11.5	Probabilistische Betrachtungen	242
4.11.6	Zusammenfassende Bewertung und Folgerungen	243
4.12	Beurteilung des Sicherheitsnachweises	245
5	Zusammenfassende Beurteilung	247
5.1	Forderung des Entsorgungsnachweises	247
5.2	Eingereichtes Projekt und Anträge der Nagra	247
5.3	Beurteilung des Standortnachweises	248
5.4	Beurteilung des Machbarkeitsnachweises	250
5.5	Beurteilung des Sicherheitsnachweises	251
5.6	Gesamturteil des Entsorgungsnachweises	253
	Referenzen	254
	Abkürzungen	268

1 Einleitung

1.1 Entsorgung der radioaktiven Abfälle

Radioaktive Abfälle dürfen, wie andere industrielle und private Sonderabfälle auch, nicht auf dem für Siedlungsabfälle vorgesehenen Weg beseitigt werden. Den Sonderabfällen ist gemeinsam, dass sie für Mensch und Umwelt eine Gefährdung darstellen. Bei den radioaktiven Abfällen rührt die Gefährdung von der Einwirkung ionisierender Strahlung (Strahlenexposition) her.

Auch in der unberührten Natur findet Strahlenexposition überall statt. In der Schweiz beträgt die durchschnittliche Strahlendosis eines Menschen aus natürlichen Quellen rund 3 mSv pro Jahr; sie schwankt stark von einem Ort zum anderen. Mensch und Umwelt haben sich seit Anbeginn in diesem Strahlungsumfeld entwickelt und sind offenbar dagegen weitgehend resistent. Wenn jede mögliche Strahlenexposition durch die Abfälle weit unterhalb dieses natürlichen Niveaus liegt, darf davon ausgegangen werden, dass weitere Massnahmen nicht notwendig sind.

Der grösste Teil der radioaktiven Abfälle, die in der Schweiz anfallen, strahlt viel zu stark, als dass die Gefahren ihrer Strahlung ausser Acht gelassen werden könnten. Von den zwei grundsätzlich möglichen Strategien im Umgang mit gefährlichen Abfällen, einerseits Verdünnen und Verteilen (z. B. Abgase) und andererseits Konzentrieren und Einschliessen, wird für die radioaktiven Abfälle in der Schweiz und in anderen Ländern hauptsächlich die zweite Strategie gewählt. Für den Einschluss sind geologische Tiefenlager vorgesehen.

Durch den Zerfall der radioaktiven Atomkerne, der Ursache der Strahlung ist, nimmt deren Anzahl stetig ab und somit auch die Intensität der Strahlung. Nach einer gewissen Zeitdauer ist die mögliche Strahlenexposition auf einem unbedenklichen Niveau. Diese Zeitdauer kann je nach Abfallsorte sehr lang sein. Bei hochaktiven Abfällen vergehen Hunderttausende von Jahren, bevor die Abfälle bezüglich Strahlung z.B. mit natürlichen Uranerzen vergleichbar werden. Die Strahlung der natürlichen Uranerze ist allerdings nicht so gering, dass keine Vorsichtsmassnahmen nötig wären.

Über die langen Zeiträume der angestrebten Isolation der radioaktiven Abfälle in einem Tiefenlager (bis Millionen von Jahren) ist ein vollständiger Einschluss der radioaktiven Stoffe nicht möglich und auch nicht nötig. Das realistische und hinreichende Ziel ist dafür zu sorgen, dass die mögliche Strahlenexposition aus den in den Lebensraum des Menschen freigesetzten radioaktiven Stoffen im Vergleich zur natürlich vorhandenen Strahlenexposition klein bleibt.

Entsorgungskonzept

Das Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003 fordert, dass die radioaktiven Abfälle in ein geologisches Tiefenlager verbracht werden (Art. 31). Ein geologisches Tiefenlager wird in Artikel 3 definiert als eine Anlage im geologischen Untergrund, die verschlossen werden kann, sofern der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt durch passive Barrieren sichergestellt wird. Die Strahlenschutzgesetzgebung definiert den Massstab der radiologischen

Sicherheit. Die pro Jahr zulässige Dosis für Personen der allgemeinen Bevölkerung aus kontrollierbarer Strahlenexposition wird in der Strahlenschutzverordnung auf insgesamt höchstens 1 mSv festgelegt. Die radiologischen Auswirkungen aus einer bestimmten Kernanlage dürfen lediglich einen Bruchteil dieses Grenzwertes ausmachen. Der zugelassene Bruchteil, der so genannte quellenbezogene Dosisrichtwert, wird in der Rahmenbewilligung festgesetzt. Für ein geologisches Tiefenlager wird von einem Wert von 0.1 mSv pro Jahr ausgegangen (Richtlinie HSK-R-21).

Künftigen Generationen sollen durch die Entsorgung keine unzumutbaren Lasten und Pflichten auferlegt werden. Vielmehr soll die heute nutzniessende Generation die erforderliche Vorsorge für die Beseitigung der Gefahren treffen. Dieser ethische Grundsatz, der in der Richtlinie HSK-R-21 enthalten ist, widerspiegelt sich in der Forderung in Art. 11 der Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, nach welcher die Langzeitsicherheit nach dem Verschluss des Lagers durch gestaffelte passive Sicherheitsbarrieren zu gewährleisten ist. Die Richtlinie HSK-R-21 legt dazu fest, dass verschiedenartige technische und natürliche Barrieren vorgesehen werden sollen. Damit soll eine möglichst grosse Robustheit gegen allfällige heute nicht vorhergesehene Ereignisse und Entwicklungen angestrebt werden.

Gemäss KEG Artikel 39 muss ein geologisches Tiefenlager vorgängig zum Verschluss während einer längeren Beobachtungsphase überwacht werden. Die Rückholung der in ein geologisches Tiefenlager eingebrachten radioaktiven Abfälle muss bis zum Verschluss des Lagers ohne grossen Aufwand möglich sein (KEG Art. 37). Die KEV legt weiter fest (Art. 11), dass Vorkehrungen zur Erleichterung der Überwachung und der Rückholung die passiven Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss des Lagers nicht beeinträchtigen dürfen.

Nachweis der Sicherheit

Es ist nützlich, Sicherheitskonzept und Sicherheitsnachweis klar zu unterscheiden. Das Sicherheitskonzept befasst sich mit der Frage, wie die Sicherheit des Tiefenlagers erreicht wird. Das Sicherheitskonzept berücksichtigt alle Barrieren, die im Bezug auf das Lager wirksam sind. Der Sicherheitsnachweis muss aufzeigen, dass mit dem umgesetzten Sicherheitskonzept keine unzulässigen Freisetzungen in die Biosphäre stattfinden werden. Beim Sicherheitsnachweis können bewusst gewisse Sicherheitsbarrieren ignoriert werden, um dadurch zu einem klareren, weniger anfechtbaren Nachweis der Sicherheit zu kommen.

Die langen Zeiträume, die im Nachweis der Sicherheit eines Tiefenlagers beachtet werden müssen, erlauben keine genauen Vorhersagen der Entwicklung des Lagers, seiner Umgebung und des Menschen. Das ist aber auch nicht erforderlich, um die Sicherheit des Lagers nachweisen zu können. Die Materialien im Tiefenlager und die geologischen Zustände entwickeln sich teils durch sehr langsame Prozesse und teils durch Vorgänge, die in verhältnismässig kurzer Zeit ablaufen.

Die langsamen geologischen Prozesse können in der Erdgeschichte über Millionen von Jahren zurückverfolgt werden. Über ihre Fortsetzung im erforderlichen Zeitraum können deshalb fundierte Aussagen gemacht werden. Dasselbe trifft auf einer etwas kürzeren Zeitskala für viele der Prozesse zu, die in den technischen Barrieren des Lagers ablaufen. Hier muss oft die fehlende Beobachtung der Vergangenheit durch wissenschaftliches Verständnis der Prozesse und durch gezielte kurzzeitige Experimente ersetzt werden.

Bei einer grossen Anzahl von möglichen Prozessen kann nicht genau vorausgesagt werden, ob und wann sie ablaufen. Hier gilt es, möglichst zuverlässig alle prinzipiell möglichen Prozesse zu erkennen, die eintreffen und für die Sicherheit des Tiefenlagers eine Rolle spielen können, um in einer Szenarienanalyse die Folgen aller Entwicklungsvarianten zu überblicken und zu bewerten. In der Sicherheitsanalyse für ein Tiefenlager spielt die Szenarienanalyse eine zentrale Rolle.

Die zukünftigen menschlichen Lebensweisen und Handlungsmöglichkeiten lassen sich schliesslich am wenigsten voraussehen. Die Richtlinie HSK-R-21 legt fest, dass bei der Berechnung der Strahlendosen eine Bevölkerung mit aus heutiger Sicht realistischen Lebensgewohnheiten als Bewertungsmassstab angenommen werden soll.

Die Szenarienanalyse selber und die Bewertung der radiologischen Folgen der einzelnen Szenarien sind immer mit Ungewissheiten behaftet. So bleibt z. B. ungewiss, ob die möglichen Abläufe richtig und vollständig erkannt werden. Auch stützt sich die Berechnung der radiologischen Folgen auf Informationen über die Materialeigenschaften, die oft nur ungenau bekannt sind. Es ist ein Bestandteil der Methodik der Sicherheitsanalyse, solche und andere Ungewissheiten möglichst klar zu erkennen und in der Szenarienanalyse zu berücksichtigen. Häufig werden die Ungewissheiten dabei durch Annahmen abgedeckt, von denen offensichtlich ist, dass sie bei der Berechnung der Konsequenzen zu einem Überschätzen der Strahlenexposition führen werden (konservative Annahmen).

1.2 Forderung des Entsorgungsnachweises

Der Bundesbeschluss zum Atomgesetz vom 6. Oktober 1978 legte in Artikel 3 fest, dass die Rahmenbewilligung für Kernreaktoren nur dann erteilt würde, wenn die dauernde, sichere Entsorgung und Endlagerung der aus der Anlage stammenden radioaktiven Abfälle gewährleistet ist. In verschiedenen Verfügungen knüpften das damalige Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement (EVED) bzw. der Bundesrat den Betrieb der bestehenden Kernkraftwerke (Beznau, Mühleberg, Gösgen und Leibstadt) an die Bedingung, dass bis 31. Dezember 1985 ein Projekt vorliege, welches für die sichere Entsorgung und Endlagerung der aus den Kernkraftwerken stammenden radioaktiven Abfälle Gewähr biete. Die Betreiber der Kernkraftwerke beauftragten daraufhin die nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) mit der Ausarbeitung des verlangten Projekts.

Am 23. Januar 1985 überreichte die Nagra den Behörden die Dokumentation über das Projekt Gewähr (NGB 85-01). Projekt Gewähr sollte aufzeigen, dass die sichere Endlagerung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz machbar ist. Es sollte die grundlegenden Zweifel an der Durchführbarkeit der Abfallentsorgung ausräumen und mögliche Lösungswege zeigen, die aufgrund des Standes von Wissenschaft und Technik mit grosser Wahrscheinlichkeit gangbar sind. Ein ausführungsreifes Projekt wurde nicht verlangt. Die benutzten erdwissenschaftlichen Daten mussten aber realistisch und durch Sondiererergebnisse erhärtet sein.

Im Projekt Gewähr wurden zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle zwei Lager vorgesehen:

- Ein Lager im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz für die hochaktiven Abfälle; die erdwissenschaftlichen Daten stammten vorwiegend aus der Sondierbohrung Böttstein.
- Ein Lager im Mergel des Oberbauenstocks (UR) für die schwach- und mittelaktiven Abfälle.

Die zuständigen Sicherheitsbehörden und Fachgremien des Bundes, insbesondere die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), unterzogen das Projekt Gewähr einer eingehenden technischen Überprüfung (HSK 23/28, HSK 23/29). Hinsichtlich der schwach- und mittelaktiven Abfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung der Kernkraftwerke sowie aus dem Bereich ausserhalb der Kernenergienutzung kamen sie zu einem positiven Schluss. Betreffend die hochaktiven und die aus der Wiederaufarbeitung stammenden langlebigen alpha-haltigen Abfälle wurde der geforderte Nachweis in drei Teilfragen unterteilt:

- Die Sicherheit des Lagers muss unter der Voraussetzung, dass der gesamte Endlagerbereich die Referenzeigenschaften aufweist, die aus den Beobachtungen in der Sondierbohrung Böttstein abgeleitet worden sind, nachgewiesen sein (Sicherheitsnachweis).
- Ein Standort, der nicht nur lokal, sondern in einem hinreichend grossen Gebiet alle jene Eigenschaften hat, die für einen positiven Sicherheitsnachweis notwendig sind, muss existieren und sich finden lassen (Standortnachweis).
- Die Realisierung des Lagers muss mit den zur Verfügung stehenden Mitteln der Technik möglich sein (Machbarkeitsnachweis).

Die überprüfenden Behörden kamen zu positiven Schlüssen was die Sicherheits- und die Machbarkeitsfrage betrifft. Aus Sicht der überprüfenden Behörden blieb die Antwort auf die Standortfrage jedoch offen: Die mit Projekt Gewähr vorgelegten erdwissenschaftlichen Grundlagen genügten nicht für eine positive Beantwortung. Die HSK kam zur Ansicht, dass die Suche nach einem geeigneten Standort im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz schwierig, aufwendig und ohne Garantie auf Erfolg sei.

Der Bundesrat schloss sich diesem Urteil an. In seinem Entscheid vom 3. Juni 1988 (BR 1988) stellte er hinsichtlich der hochaktiven Abfälle und der aus der Wiederaufarbeitung stammenden langlebigen alpha-haltigen Abfälle fest, dass der Sicherheitsnachweis, nicht aber der Standortnachweis erbracht sei; aus bautechnischer Sicht bestünden keine Bedenken. Er forderte deshalb die Bewilligungsinhaber der Kernkraftwerke auf, die Forschungsarbeiten im Hinblick auf die Endlagerung der hochaktiven Abfälle auf nicht-kristalline Wirtgesteine, d.h. Sedimentgesteine auszudehnen. Bis zum Entscheid des Bundesrats über den nachzuholenden Standortnachweis bleiben die Betriebsbewilligungen der bestehenden Kernkraftwerke in Kraft. Für den nachzuholenden Standortnachweis legte der Bundesrat keinen Termin fest. Mit der Regelung der Berichterstattung über die laufenden Arbeiten der Nagra (EVED 1988) legte das EVED das weitere Vorgehen fest.

Das neue Kernenergiegesetz vom 21. März 2003 wurde am 1. Februar 2005 in Kraft gesetzt und löst das Atomgesetz und den diesbezüglichen Bundesbeschluss ab. Das Kernenergiegesetz enthält präzisere Bestimmungen hinsichtlich der Entsorgung der radioaktiven Abfälle als die bisherige Gesetzgebung (vgl. Abschnitt 1.1). In Artikel 13 wird weiterhin der Nachweis für die Entsorgung der aus einer Kernanlage anfallenden radioaktiven Abfälle als Voraussetzung für die Erteilung der Rahmenbewilligung gefordert. In den Übergangsbestimmungen (Art. 106) wird zudem gefordert, dass die Eigentümer der bestehenden Kernkraftwerke den Entsorgungsnachweis innert zehn Jahren erbringen müssen, soweit der Bundesrat diesen Nachweis nicht bereits als erfüllt beurteilt hat.

1.3 Eingereichtes Projekt und Anträge der Nagra

Zur Erfüllung der im Abschnitt 1.2 erläuterten gesetzlichen Auflage hat die Nagra am 20. Dezember 2002 das Projekt Opalinuston eingereicht (Nagra 2003). Damit betrachtet sie den Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente (BE), verglaste hochaktive Abfälle (HAA) sowie langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) als erbracht. Das Projekt der Nagra stützt sich hauptsächlich auf erdwissenschaftliche Daten zum Opalinuston im Zürcher Weinland.

Ein Modelllager im Opalinuston weist deutliche Unterschiede zu einem Lager im kristallinen Grundgebirge auf, wie es seinerzeit mit Projekt Gewähr vorgelegt wurde. Das Wirtgestein Opalinuston und die umgebende geologische Situation im Zürcher Weinland beeinflussen die Auslegung eines allfälligen Tiefenlagers sowie das Zusammenwirken der einzelnen technischen und natürlichen Sicherheitsbarrieren; sie stellen zudem neue bautechnische Herausforderungen. Der von der Nagra vorgelegte, auf der Option Opalinuston beruhende Entsorgungsnachweis umfasst daher alle drei Teilnachweise:

- **Sicherheitsnachweis:** Dieser muss zeigen, dass im gewählten Wirtgestein, mit den aufgrund von Sondierbefunden nachgewiesenen geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften und mit den technischen Barrieren, die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers gewährleistet ist.
- **Standortnachweis:** Dieser muss aufgrund dokumentierter Untersuchungsergebnisse zeigen, dass ein genügend grosser Wirtgesteinskörper mit den im Sicherheitsnachweis festgehaltenen Eigenschaften existiert, so dass die Realisierung eines Tiefenlagers im besagten Standortgebiet mit guter Aussicht auf Erfolg in Angriff genommen werden könnte.
- **Machbarkeitsnachweis:** Dieser muss zeigen, dass im gewählten Wirtgestein ein Tiefenlager unter Einhaltung der Sicherheitsvorschriften, mit den heute vorhandenen technischen Mitteln gebaut, betrieben und langfristig sicher verschlossen werden kann.

Die Berichterstattung zum Entsorgungsnachweis wurde im Jahre 2003 veröffentlicht. Die Dokumentation besteht aus drei Hauptberichten, dem bautechnischen Projekt (NTB 02-02), der Synthese der erdwissenschaftlichen Untersuchungen (NTB 02-03) und der sicherheitstechnischen Beurteilung (NTB 02-05, in Englisch). Diese drei Hauptberichte stützen sich ihrerseits auf über 100 Referenzberichte ab, die bis Sommer 2003 veröffentlicht wurden.

Zusätzlich zur Erfüllung der gesetzlichen Auflage formulierte die Nagra für das Projekt Opalinuston weitere Ziele. Die Unterlagen sollen dem Bundesrat als Grundlage für die Festlegung des weiteren Vorgehens im Hinblick auf die Entsorgung der abgebrannten Brennelemente, der verglasten hochaktiven Abfälle sowie der langlebigen mittelaktiven Abfälle dienen. Zusätzlich liefert das Projekt auch der Nagra Unterlagen für die Planung der künftigen Entsorgungsarbeiten, einschliesslich der Schätzung der Kosten. Schliesslich sollen damit Grundlagen für eine eingehende gesellschaftliche Diskussion der Entsorgungsfragen bereitgestellt werden.

Die Nagra ist der Ansicht, das Projekt Opalinuston sei den vorangehend aufgezählten Zielvorgaben gerecht geworden. Mit dem untersuchten Lagerprojekt im potentiellen Standortgebiet im Zürcher Weinland sei gezeigt, dass die sichere, dauernde Entsorgung von abgebrannten Brennelementen, verglasten hochaktiven Abfällen und langlebigen mittelaktiven

Abfällen in einem geologischen Tiefenlager möglich ist. Gestützt darauf stellt die Nagra dem Bundesrat zwei Anträge:

- Von der Erfüllung der Auflagen zum Projekt Gewähr gemäss Beschluss des Bundesrats vom 3. Juni 1988 sei im zustimmenden Sinne Kenntnis zu nehmen und der Entsorgungsnachweis als erbracht zu genehmigen.
- Der Fokussierung künftiger Untersuchungen in Hinblick auf eine geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, verglasten hochaktiven Abfälle sowie langlebigen mittelaktiven Abfälle in der Schweiz auf den Opalinuston und das potentielle Standortgebiet im Zürcher Weinland sei zuzustimmen.

Das Projekt bezweckt hingegen nicht die Festlegung eines Standorts für ein entsprechendes Tiefenlager. Dafür wird in einem weiteren Schritt das Rahmenbewilligungsverfahren nach Kernenergiegesetz einzuleiten sein.

1.4 Behördliche Überprüfung

Neben der HSK wurde auch die Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA) mit der Überprüfung des eingereichten Projekts beauftragt. Wie bei der Überprüfung von Projekten im Rahmen von Bewilligungsverfahren nimmt die KSA auch zum Gutachten der HSK Stellung.

Auch die Kommission Nukleare Entsorgung (KNE), eine Subkommission der eidg. Geologischen Fachkommission, welche die HSK in erdwissenschaftlichen Fragen der nuklearen Entsorgung berät und unterstützt, ist in die Überprüfung des Entsorgungsnachweises involviert worden. Die KNE überprüfte und beurteilte erdwissenschaftliche und bautechnische Aspekte des vorgelegten Projekts und dokumentierte die Ergebnisse in Expertenberichten zuhanden der HSK (KNE 2005). Die Beurteilungen der KNE flossen in das vorliegende Gutachten der HSK ein.

In Ergänzung zu den Überprüfungen durch die zuständigen schweizerischen Stellen erfolgte eine Expertise durch eine internationale Expertengruppe. Auf Ersuchen des Bundesamts für Energie (BFE) hat die Nuklearenergieagentur (NEA) der OECD eine solche Expertengruppe zusammengestellt, die die Überprüfung der Sicherheitsanalyse zum Entsorgungsnachweis aus internationaler Sicht vorgenommen hat. Das Ergebnis (NEA 2004) ist im Frühjahr 2004 veröffentlicht und am 27. April 2004 in Marthalen (ZH) den schweizerischen und deutschen Behörden sowie den Medien präsentiert worden. Die Expertengruppe kommt zum Schluss, dass die Sicherheitsanalyse auf ausgewogenen Daten und Argumenten beruht und den aktuellen internationalen Empfehlungen und Praktiken entspricht. Nach Auffassung der Expertengruppe werden die günstigen Eigenschaften des Opalinustons im Zürcher Weinland sowie die Sicherheit des Systems der technischen Barrieren wissenschaftlich fundiert nachgewiesen. Auch die Beurteilungen der internationalen Expertengruppe fliessen in das vorliegende Gutachten der HSK ein.

In Ergänzung zur KNE und zur internationalen Expertengruppe zog die HSK zur Überprüfung des Projekts noch weitere externe Experten bei, die spezielle Fragestellungen zu bearbeiten hatten. Die entsprechenden Expertenberichte stellen eine weitere Basis des vorliegenden Gutachtens dar. Schliesslich sind detaillierte Beurteilungen einzelner Aspekte durch die HSK in internen HSK-Berichten dokumentiert, auf die hier ebenfalls abgestützt wird.

Das vorliegende Gutachten der HSK bezieht sich auf den Entsorgungsnachweis und nimmt somit Stellung zum ersten Antrag der Nagra. Es ist nicht der Zweck dieses Gutachtens, das Auswahlverfahren zu beurteilen, das zur Wahl des Opalinustons im Zürcher Weinland geführt hat; hierzu hat die HSK anderweitig Stellung genommen (HSK 23/74). Sie hat ferner eine Gesamtübersicht über sämtliche Entscheidungen und Tätigkeiten im Hinblick auf die geologische Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle in der Schweiz gegeben (HSK-AN-5262).

Zum zweiten Antrag der Nagra betreffend die Fokussierung künftiger Untersuchungen auf den Opalinuston im Zürcher Weinland hat der Bundesrat am 3. Dezember 2004 im Rahmen der Beantwortung eines parlamentarischen Vorstosses Stellung genommen. Am 17. Juni 2004 reichte Nationalrat Hans-Jürg Fehr (SH) das Postulat „Standort Atommüll-Endlager. Varianten evaluieren“ ein. Der Bundesrat beantragt dem Parlament die Annahme dieses Postulates (BR 2004). Er ist der Meinung, dass im Hinblick auf die Standortwahl für ein geologisches Tiefenlager für hochaktive Abfälle neben dem Zürcher Weinland weitere Alternativen aufgezeigt werden sollen. Es müsse dargelegt werden können, dass eine breite Evaluation stattgefunden hat und allenfalls Reservestandorte zur Verfügung stehen. Ob andere Gesteinsoptionen (z.B. Kristallin oder Untere Süsswassermolasse) weiter untersucht werden sollen oder für die Standortfestlegung eine Fokussierung auf Gebiete mit Opalinuston sinnvoll ist, wird der Bundesrat erst nach der sicherheitstechnischen Begutachtung des Entsorgungsnachweises und dem öffentlichen Auflageverfahren entscheiden.

1.5 Ziel und Gliederung des Gutachtens

Im vorliegenden Gutachten wird die Frage beantwortet, ob die verbleibenden Zweifel an der Machbarkeit einer sicheren geologischen Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, der verglasten hochaktiven Abfälle und der langlebigen mittelaktiven Abfälle in der Schweiz nun ausgeräumt sind. Zu diesem Zweck werden alle Elemente des von der Nagra vorgelegten Projekts überprüft, die zur Beurteilung der grundsätzlichen Machbarkeit von Bedeutung sind.

Als Ergebnis ihrer Überprüfung soll die HSK dem Bundesrat eine Empfehlung für seinen Entscheid abgeben, ob der geforderte Entsorgungsnachweis erbracht worden sei, oder nicht. Die HSK hatte sich zum Ziel gesetzt, folgende Elemente in ihre Empfehlung an den Bundesrat einzubauen: Sollte sie zum Schluss kommen, dass der Entsorgungsnachweis aus ihrer Sicht noch nicht erbracht ist, dann würde sie genau angeben, welche Anforderungen an den Nachweis zu welchem Grad nicht erfüllt sind. Im Falle einer positiven Beurteilung des Entsorgungsnachweises würde die HSK auf noch offene Fragen hinweisen, die im Falle einer Weiterführung des Projekts hinsichtlich einer Realisierung zu klären wären.

Die Gliederung des vorliegenden Gutachtens lehnt sich an die Unterteilung des Entsorgungsnachweises in drei Teilnachweise an. Zu jedem überprüften Aspekt werden jeweils die Angaben der Nagra zusammengefasst und anschliessend die Beurteilung der HSK dokumentiert.

Kapitel 2 ist dem Standortnachweis gewidmet. Zunächst wird der Begriff „Standortnachweis“ präzisiert; auch werden die im Voraus festgelegten Beurteilungskriterien des Standortnachweises erläutert. Wesentliche Elemente, die überprüft werden, sind der geologische Aufbau (Schichtabfolge) und die tektonischen Strukturen (Störungsmuster) im Untersuchungsgebiet

sowie die Lithologie des Opalinustons und der Rahmengesteine. Auch werden die für die Sicherheit massgeblichen hydrogeologischen (Durchlässigkeiten, Potenziale, Wasserflüsse) und hydrochemischen Verhältnisse eingehend überprüft. Die Betrachtungen zur möglichen Langzeitentwicklung (bis zu einer Million Jahre und darüber) des geologischen Systems, insbesondere hinsichtlich Hebung und Erosion, sowie zu den potenziellen Nutzungskonflikten des Untergrunds wegen allfälligen Rohstoffen runden die Überprüfungen ab. Als Abschluss des Kapitels werden die Folgerungen zum Standortnachweis gezogen.

Im Kapitel 3 wird der Machbarkeitsnachweis überprüft und beurteilt. Als Beurteilungsgrundlage dient grundsätzlich der Stand der Technik im Untertagebau. Das wesentlichste der Überprüfung unterzogene Element ist das bautechnische Projekt. Darüber hinaus werden auch der Betrieb des Tiefenlagers, die Rückholbarkeit von eingelagerten Abfallgebinden sowie die Überwachung und der Verschluss des Lagers betrachtet und geprüft, ob die grundsätzliche Machbarkeit in Frage gestellt werden könnte. Das Kapitel wird mit der Beurteilung des Machbarkeitsnachweises abgeschlossen.

Kapitel 4 bezieht sich auf den Sicherheitsnachweis. Hier wird die Langzeitsicherheit nach dem Verschluss des Lagers betrachtet. Die entsprechenden Beurteilungsgrundlagen sind die Bestimmungen der Richtlinie HSK-R-21. Zunächst werden das Sicherheitskonzept sowie die Methodik zum Sicherheitsnachweis dargelegt und beurteilt. Das Endergebnis der Sicherheitsanalyse ist die Quantifizierung der Strahlendosis, die aus dem verschlossenen Tiefenlager entstehen könnte. Diese wird aus der Radionuklid-Freisetzung in den Lebensraum des Menschen ermittelt. Zur Berechnung dieser Freisetzung werden das Aktivitätsinventar der eingelagerten Abfälle sowie das zeitliche Verhalten der technischen und der natürlichen Barrieren unter den anzunehmenden Entwicklungsszenarien bewertet. Die Beurteilung des Sicherheitsnachweises stellt den Abschluss des Kapitels dar.

Im abschliessenden Kapitel 5 werden die wesentlichen Feststellungen und Folgerungen aus der Überprüfung zusammengefasst und das Gesamturteil der HSK zum Entsorgungsnachweis gegeben.

Innerhalb der einzelnen Kapitel und Abschnitte werden die behandelten Themen in der Regel mit einer Zusammenfassung der relevanten Aussagen der Nagra eingeleitet. Diese Zusammenfassungen („Angaben der Nagra“) sind nicht wörtlich den Berichten der Nagra entnommen, sondern geben das Verständnis der HSK der dort angesprochenen Sachverhalte wieder.

2 Standortnachweis

2.1 Beurteilungsgrundlagen

Im Rahmen der Begutachtung des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston Zürcher Weinland prüft die HSK, ob neben dem Sicherheitsnachweis und dem Nachweis der bautechnischen Machbarkeit auch der Standortnachweis erbracht wurde. Hinsichtlich der Definition des Begriffs „Standortnachweis“ sind HSK, KNE, KSA, Nagra und AGNEB zu einem Konsens gelangt (AGKN 1996 und HSK 23/57). Der Standortnachweis wurde für die Option Opalinuston wie folgt definiert:

Der Standortnachweis muss aufgrund dokumentierter Untersuchungsergebnisse zeigen, dass ein genügend grosser Gesteinskörper mit den im Sicherheitsnachweis festgehaltenen Eigenschaften existiert, so dass die Realisierung eines Tiefenlagers im besagten Standortgebiet mit guter Aussicht auf Erfolg in Angriff genommen werden könnte.

Um Missverständnissen bei der Interpretation des Begriffs „Standortnachweis“ vorzubeugen, wurde dieser präzisierend erläutert (AGKN 1996):

Auf dem Weg zur Realisierung eines Tiefenlagers ist der Standortnachweis ein wichtiger Zwischenschritt, der mit Untersuchungen von der Erdoberfläche aus erreicht werden soll. Die Untersuchungen sind dabei der Natur der geologischen Gegebenheiten (tektonische und hydrogeologische Situation, Homogenität bzw. Heterogenität der Gesteinsbeschaffenheit) anzupassen. Für den Standortnachweis müssen die Untersuchungen so weit fortgeschritten sein, dass ein für das Wirtgestein repräsentativer Datensatz vorliegt. Die Eignung des für die Realisierung eines Tiefenlagers ausgewählten Standortes muss in einem nächsten Schritt mit einem umfangreichen untertägigen Erkundungsprogramm (Schacht, Stollen etc.) bestätigt werden.

Abgestützt auf die Funktion der Geosphäre im Sicherheitskonzept, haben die Behörden folgende grundsätzliche Anforderungen an ein Standortgebiet abgeleitet (HSK 23/57):

1. Genügende Ausdehnung des Wirtgesteins: Das im Standortgebiet in geeigneter Tiefenlage vorhandene Wirtgestein muss Bereiche aufweisen, die sich bezüglich ihrer Grösse und ihrer Form für die Anordnung der Endlagerbauwerke eignen.
2. Geringe Durchlässigkeit: Die Beschaffenheit des Wirtgesteins muss so sein, dass die grossräumige Durchlässigkeit gering ist und auch allfällige Wasserfliesspfade kleine Transmissivitäten haben.
3. Ruhige Lagerung: Das Wirtgestein soll ruhige tektonische Lagerungsverhältnisse und eine lateral verfolgbare Faziesausbildung aufweisen.
4. Geeignete felsmechanische Eigenschaften: Das Wirtgestein muss im Lagerbereich felsmechanische Minimalanforderungen erfüllen. Die Schichten oberhalb des Wirtgesteins müssen das Abteufen von Schächten bzw. einer Rampe ermöglichen.

5. Geologische Langzeitstabilität: Das Standortgebiet muss gewährleisten, dass die für das Lagersystem günstigen Eigenschaften so lange erhalten bleiben, bis die Aktivität der Abfälle weitgehend abgeklungen ist.
6. Fehlende Ressourcen: Im Standortgebiet sollen keine aussergewöhnlichen Ressourcen (z.B. Erzvorkommen, Kohle, Erdöl, Erdgas und Geothermie) vorkommen, deren Nutzung durch das Lager verunmöglicht wird; bei eventuellen Nutzungskonflikten sind Vorrangentscheide notwendig.

Ein Standortgebiet muss bezüglich Prognostizierbarkeit und Explorierbarkeit so beschaffen sein, dass die hier aufgeführten Anforderungen mit den heute zur Verfügung stehenden Erkundungstechnologien mit genügender Zuverlässigkeit abgeklärt werden können. Die Abklärung erfolgt sowohl durch Erkundung (Exploration) des eigentlichen Standortgebietes, als auch durch standortunabhängig erhobene, übertragbare Daten (Felslabor Mont Terri, relevante Tiefbohrungen, Untertagebauten). Die Eignung des Standortgebietes darf durch die bei der Erkundung allenfalls verursachten Schichtverletzungen nicht in Frage gestellt werden.

In der Aktennotiz HSK 23/57 werden detaillierte Beurteilungsmerkmale für einen Standort im Opalinuston aufgeführt.

Bei der Überprüfung des Standortnachweises orientiert sich die HSK an diesen Beurteilungskriterien. Sie beschränkt sich dabei auf diejenigen Punkte, die für eine Beurteilung des Entsorgungsnachweises notwendig sind. Es ist nicht beabsichtigt, das umfangreiche Datenmaterial in den Nagra-Berichten, das die Fragestellung des Entsorgungsnachweises übersteigt, detailliert zu kommentieren. Es ist auch nicht Zweck der nachfolgenden Ausführungen, das Auswahlverfahren, das zum Gebiet Zürcher Weinland führte, zu beurteilen.

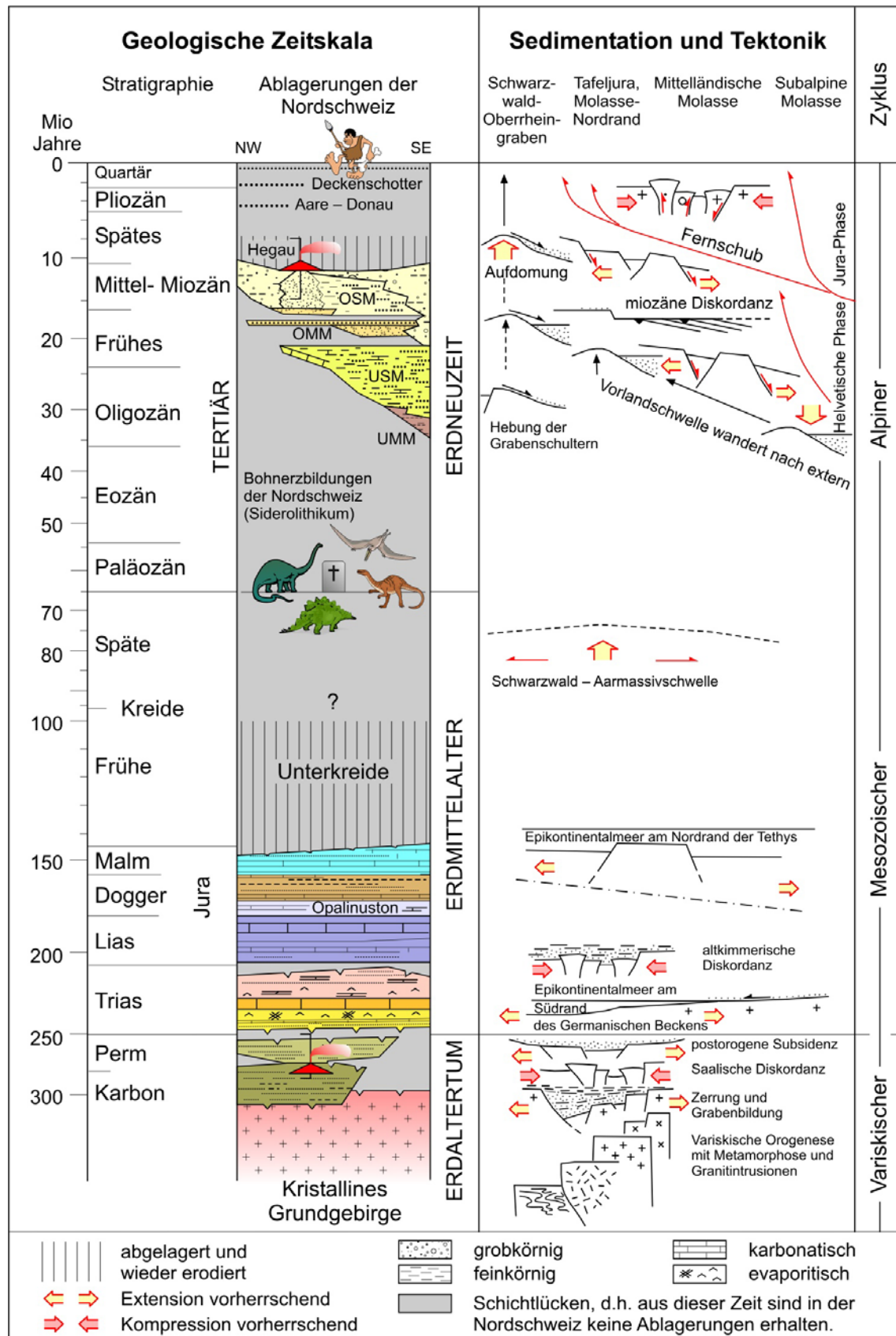
2.2 Geologie des Zürcher Weinlands

2.2.1 Geologisch-tektonischer Überblick

Angaben der Nagra

Die geologische Entwicklung der Nordschweiz kann in drei Entwicklungsphasen eingeteilt werden (Fig. 2.2-1):

- Bildung und Konsolidierung des kristallinen Grundgebirgssockels mit den Permokarbon-Trögen im Zusammenhang mit der variskischen (auch herzynisch genannten) Gebirgsbildung im Paläozoikum.
- Subsidenz der kontinentalen Plattform und Ablagerung von mehr als 1000 m mächtigen, unverfestigten Sedimentgesteinen im Mesozoikum. Gleichzeitig Gliederung des Ablagerungsraumes durch leichte synsedimentäre Bewegungen an paläozoischen Störungszonen.
- Bildung des Molassebeckens und strukturelle Überprägung der Nordschweiz im Einflussbereich der alpinen Gebirgsbildung während dem Känozoikum (Tertiär und Quartär).



Figur 2.2-1: Überblick über die geologische Entwicklung der Nordschweiz (aus NTB 02-03).

Projektbezogen ist bei der paläozoischen Entwicklung vor allem die tektonische Ausgestaltung des Sockels von Interesse, weil die paläozoischen Strukturen bei den jüngeren tektonischen Phasen als bereits existierende Schwächezonen den tektonischen Bewegungen als Schienen dienten. Bei der mesozoischen Entwicklung stehen die lithologischen Eigenschaften der Gesteine sowie die paläogeographischen und lithofaziellen Verhältnisse im Vordergrund, denn sie bilden die Grundlage für Prognosen zu lateralen Änderungen der einzelnen Schichten (Rahmengesteine und Wirtgestein). In der jüngsten geologischen Geschichte, während dem Tertiär und Quartär, ist die heute vorliegende Schichtlagerung, d.h. das gegenwärtige tektonische Muster, entstanden. Aus den heute beobachtbaren Verhältnissen und aus den aktuellen Bewegungstrends können wichtige Grundlagen für die Langzeitprognosen der zukünftigen geologischen Entwicklung abgeleitet werden.

Figur 2.2-2 zeigt den geologischen Rahmen des Zürcher Weinlands. Das Untersuchungsgebiet liegt grösstenteils in der autochthonen Molasse der Ostschweiz und damit am Nordrand des Molassebeckens. Der südliche Teil gehört zum Gebiet von abgescherter Molasse und Mesozoikum. Nördlich des Weinlandes erstreckt sich der Tafeljura. Die regionalen tektonischen Elemente sind von dieser Lage geprägt: Neben NW-SE streichenden, variskischen Störungen des Schwarzwald-Tafeljuras (Randen-Störung, Neuhauser Störung, etc.) finden sich vor allem auch WSW-ENE streichende, zum Molassebecken parallele Störungszonen (Baden-Irchel-Herdern-Lineament, Flexur von Rafz-Marthalen, Rüdlinger Flexur, etc.). Die beiden Störungsmuster interferieren im Untersuchungsgebiet der Nordschweiz. Die Nordgrenze des Jurafernschubes erreicht den Süden des Gebietes, nördlich davon scheidet die Nagra eine „neotektonische Kompressionszone“ aus, deren Ausdehnung nach Norden nicht genau abgrenzbar ist.

Der alte variskische Sockel mit dem auflagernden Deckgebirge zeigt ein tektonisches Muster, das auf drei strukturelle Trends zurückgeführt werden kann:

- Rheinisch streichende Strukturen (NNE-SSW) treten vor allem im Gebiet des Rheintalgrabens und im westlichen Tafeljura auf.
- Variskische Lineationen (NW-SE) prägen vor allem den Südostschwarzwald und den angrenzenden Tafeljura. Dazu gehören auch die Strukturen des Hegau-Bodensee-Grabens.
- Jurassisch/alpin streichende Elemente (WSW-ENE) spielen im Untersuchungsgebiet eine wichtige Rolle. Sie verlaufen mehr oder weniger parallel zur Richtung des Nordschweizer Permokarbondrogens.

Die Strukturen treten überwiegend als steil stehende Abschiebungen mit Verwerfungsbeiträgen von maximal einigen Dekametern in Erscheinung. Grössere Versetzungen treten nur an einzelnen regional ausgedehnten Bruchzonen auf, wie beispielsweise an der Randen-Störung. Im Bereich des Nordschweizer Permokarbondrogens gibt es Hinweise auf Kristallin-Hochzonen (Bohrungen Herdern, Kreuzlingen und Benken), wo das mesozoische Deckgebirge direkt auf kristallinem Grundgebirge liegt.



Figur 2.2-2: Tektonische Übersichtskarte des Zürcher Weinlands und seiner Umgebung (aus NTB 02-03).

Mit Hilfe von neotektonischen Untersuchungen hat die Nagra versucht, das gegenwärtig herrschende Bewegungsmuster der tektonischen Strukturen zu ermitteln. Die Resultate bestätigen die Annahme, dass sich das Gebiet Zürcher Weinland im Interferenzbereich zwischen dem von der alpinen Gebirgsbildung verursachten Fernschub des Deckgebirges und der Hebungszone des Südschwarzwaldes und seiner Randgebiete befindet. Es wurde aufgrund der Lage am Rand der beiden Einflussgebiete verhältnismässig wenig überprägt.

Die Nagra stellt fest, dass das Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland insgesamt ein tektonisch einfaches Gebiet darstellt. Zwar liegt es im Einflussbereich des alpinen Fernschubs, aber ausserhalb der Vorfaltenzone mit seismisch kartierbaren Flexuren und Aufschiebungen.

Beurteilung der HSK

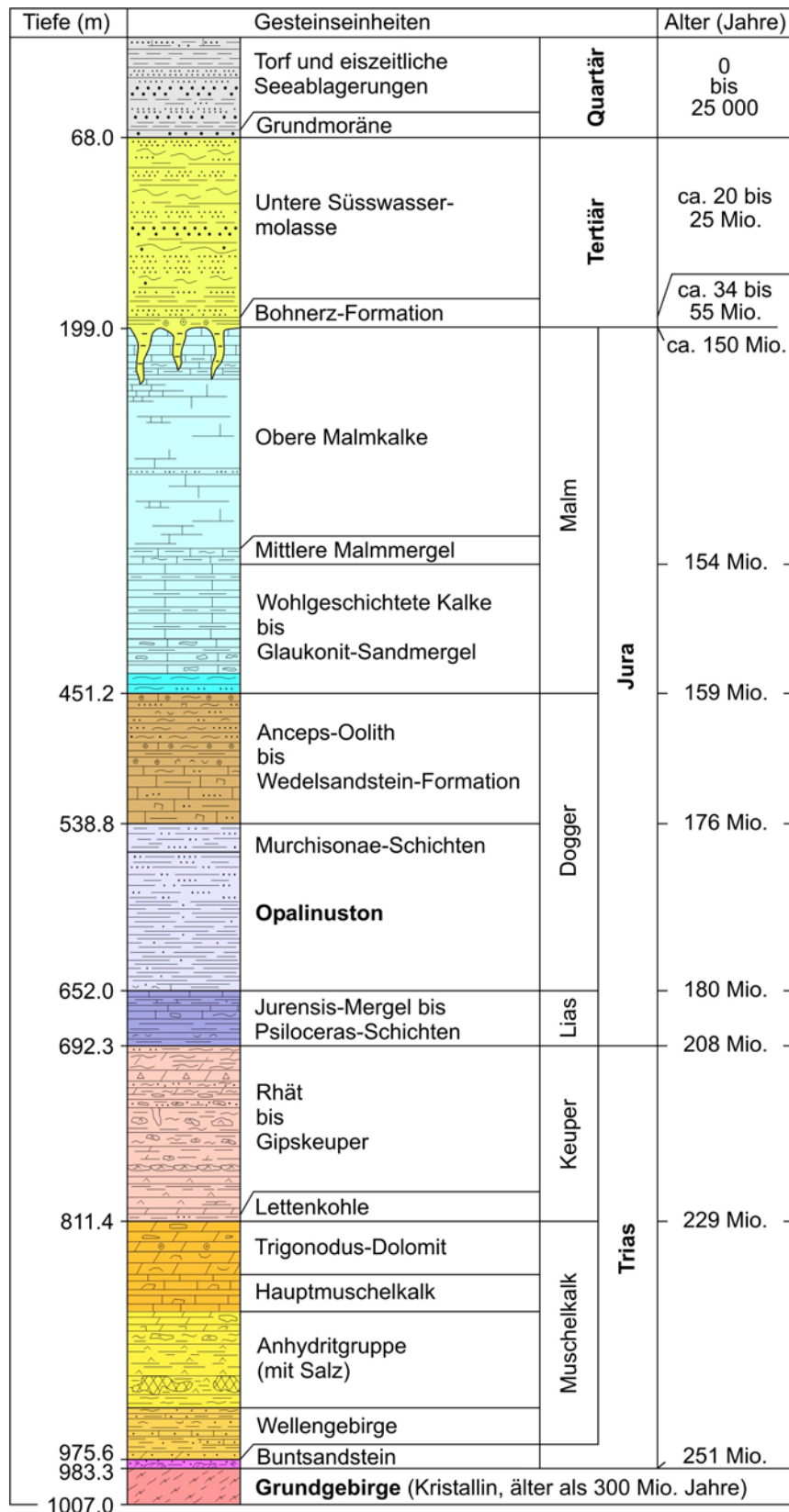
Die HSK stellt fest, dass die von der Nagra durchgeführten Arbeiten ausführlich dokumentiert sind und dass das in die Untersuchungen einbezogene Gebiet für die Fragestellung des Entsorgungsnachweises angemessen ist. Die Arbeiten sind eine gute Synthese aus Literaturdaten und aus Daten, die die Nagra selbst gewonnen hat. Die Experten der HSK, insbesondere die KNE, attestieren den Arbeiten der Nagra höchste wissenschaftliche Qualität. Wie weiter unten dargelegt wird, sind einige Aspekte der regionalen geologischen Entwicklung weiterhin Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen. Es dürfte somit in Zukunft mit neuen Interpretationen zu rechnen sein.

2.2.2 Schichtfolge im Untersuchungsgebiet

Die Kenntnisse der Schichtserien im Untergrund stammen vor allem aus Bohrungen der Nagra und der Erdölindustrie und aus umfangreichen geophysikalischen Erkundungen (Seismik). In der Bohrung Benken wurde unter den rund 1000 m mächtigen Sedimentgesteinen kristallines Grundgebirge erschlossen. Der Kristallin-Horst der Hochzone Benken grenzt im Süden an den Nordschweizer Permokarbondrog, der eine Sedimentserie, vergleichbar der Abfolge in der Bohrung Weiach, enthalten dürfte. Auch nördlich der Hochzone wird ein Permokarbon-Trog vermutet, er wird allerdings nur aufgrund von seismischen Daten vermutet und ist mit keiner Bohrung nachgewiesen (Beilage 2.4 in NTB 99-08).

Die Schichten des Mesozoikums sind im Zürcher Weinland rund 800 m mächtig (Fig. 2.2-3). An der Basis liegen die Gesteine der Trias, die in der Bohrung Benken 291 m mächtig sind. Es handelt sich um festländische und marine Ablagerungen, die teilweise variabel, lagenweise aber auch konstant ausgebildet sind. Dies widerspiegelt die wechselhaften Bedingungen, die wegen der tektonischen Ereignisse zur Zeit der Ablagerung im Germanischen Trias-Becken herrschten. Die Abfolge beinhaltet mächtige Evaporithorizonte (Anhydritgruppe, Gipskeuper).

Die Schichten der Jurazeit, unter ihnen der Opalinuston, sind durchwegs marine Ablagerungen. Es handelt sich überwiegend um Tonsteine, Mergel und Kalke, die in einem Ablagerungsraum von weniger als 200 m Wassertiefe gebildet wurden. Die grosse Mächtigkeit der Abfolge, in Benken sind knapp 500 m erhalten, konnte sich im seichten Schelfmeer nur aufgrund einer allmählichen Subsidenz des Meeresbodens bilden. Das Dach des Mesozoikums bilden die mächtigen Kalkformationen des Malms. Die verkarstete Oberfläche der Malmformation entstand während der Kreide- und der frühen Tertiärzeit, sie bildet die Basis der tertiären Formationen.



Figur 2.2-3: Lithostratigraphisches Profil der Bohrung Benken (aus NTB 02-03).

Die Ablagerungen der Molasse umfassen festländische und marine Sedimente. Im Zürcher Weinland stehen vor allem die Untere Süsswassermolasse und stellenweise die Obere Meeresmolasse an, auf den Anhöhen finden sich auch bescheidene Vorkommen der Oberen Süsswassermolasse. In der Bohrung Benken wurden 130 m Untere Süsswassermolasse aber keine Obere Meeresmolasse durchbohrt; die Felsoberfläche lag 68 m unter Terrain.

Die jüngsten Ablagerungen der Quartärzeit beginnen in der Bohrung Benken mit einer Grundmoräne (Kies und Sand) der letzten Eiszeit. Darüber liegen Sande und Silte, die teilweise tonig sind; sie werden als fluviatile Ablagerungen interpretiert. Zuoberst liegen feinkörnige tonige Seebodenablagerungen.

Im Rahmen der Sicherheitsanalyse wurde von den Gesteinsformationen hauptsächlich der Opalinuston als Barriere in Anspruch genommen. Nachfolgend werden die wichtigsten geologischen Eigenschaften dieses Gesteins aufgeführt und beurteilt. Anschliessend werden die Umgebungsgesteine (Rahmengesteine) besprochen. Für eine detaillierte Beschreibung der Gesteinseigenschaften wird auf das Kapitel 5 in NTB 02-03 verwiesen.

2.2.3 Lithologie des Opalinustons

Angaben der Nagra

Der Opalinuston in der Nordschweiz besteht aus dunkelgrauen Tonsteinen (Peliten) mit eingeschalteten Silt- und Feinsandlagen, Kalkbänkchen sowie Lagen mit Kalk-Konkretionen. Allia (1996) konnte verschiedene Lithofaziestypen unterscheiden, nämlich:

- homogene Pelite ohne primäre Sedimentstrukturen,
- laminierte Pelite mit lagiger, durch Korngrössenwechsel gebildeter Feinschichtung,
- dünne, gradierte Quarz-Silt-Lagen, 1–5 mm dick und lateral bis zu mehreren Metern durchhaltend,
- diskontinuierliche, arenitische Lagen bis zu 10 cm dick, hauptsächlich aus bioklastischen Kalken oder Feinsandsteinen bestehend, mit Übergängen zwischen beiden Endgliedern,
- kontinuierliche, arenitische Lagen aus Kalk und oder Quarz, maximal 15 cm dick, die sich lateral über mehrere Meter oder Dekameter erstrecken,
- Konkretionen, die in einzelnen Profilabschnitten häufig und meist in Lagen angereichert sind,
- knollenführende Bänke mit sekundär angereicherten kalzitischen Konkretionen, die auf synsedimentäre Erosion auf lokalen Schwellenzonen zurückzuführen sind (Wetzel und Allia, 2000).

Die verschiedenen Lithofazies bilden im Opalinuston sedimentäre Abfolgen, in denen der Anteil der gröberen Korngrössen auf Kosten des Tonanteils nach oben zunimmt. Diese als Dachbankzyklen bezeichneten Abfolgen schliessen gegen oben meist mit einer diskontinuierlichen, arenitischen Lage ab. Die Dachbankzyklen des Opalinustons sind meist unvollständig entwickelt. Die Mächtigkeit der Zyklen beträgt meist 4-8 m. Die Zyklen sind auf den bohrlochgeophysikalischen Aufnahmen nachweisbar. Im oberen Opalinuston sind sie deutlicher ausgebildet. Für praktische Belange hat die Nagra 6 Gesteinseinheiten definiert (NTB 02-03, S. 228). Diese Einheiten können grösstenteils auch im Felslabor Mont Terri ausgeschieden werden.

Der Opalinuston entstand aus kontinentalen Verwitterungsprodukten: Tonmineralien, Quarz, wenig Feldspäte in Silt- bis Sandfraktion, weiter marine Karbonate (kalzitische Muscheln und Bioklasten) und diagenetische Neubildungen wie Pyrit, Siderit und Kalzit. Der Opalinuston enthält auch geringe Mengen an organischem Material, welches sowohl kontinentalen wie auch marinen Ursprungs sein kann. Dass diese organische Substanz über geologische Zeiträume erhalten blieb, weist darauf hin, dass im Porenwasser des Tonsteins über geologische Zeiträume stabile reduzierende Bedingungen herrschten.

Der Opalinuston wurde in einem Flachmeer von wenigen Dekametern Wassertiefe gebildet. Nach der Versenkung und Überdeckung mit jüngeren Sedimenten wurde er durch die Auflast kompaktiert, dabei wurde der Porenraum stark reduziert und das Porenwasser zum grössten Teil ausgetrieben.

Eine Besonderheit der Region Zürcher Weinland ist die Ausbildung der Schichten über dem eigentlichen Opalinuston. Die eisenoolithischen Murchisonae-Schichten, die andernorts über dem Ton liegen, sind im Gebiet Benken auf eine dünne Bank reduziert (Oberbeta-Oolith). Die unter dieser Bank liegenden Gesteine sind in der Bohrung Benken vom Opalinuston nicht abtrennbar, sie liegen in gleicher Ausbildung vor. Sie müssen darum lithostratigraphisch der Opalinuston-Formation zugeschlagen werden. Unter Einbezug dieser Schichten ist der Opalinuston in der Bohrung Benken rund 113 m mächtig.

Die Schichtung ist das dominante Strukturelement des Opalinustons, sie ist eine wichtige Ursache der Anisotropie der verschiedenen Gesteinseigenschaften. Die Lithologie und Mineralogie sind im regionalen Massstab homogen, die Gehalte der Minerale schwanken innerhalb enger Grenzen. In Benken sind die Quarz- und Karbonatgehalte im Vergleich zur zentralen Nordschweiz und zum Mont Terri leicht höher. Die Unterschiede sind allerdings gering. Mit Ausnahme der sandig-kalkigen Fazies kann deshalb der Opalinuston des Felslabors Mont Terri problemlos mit den Vorkommen im Zürcher Weinland korreliert werden. Mineralisierungen und Adern sind an beiden Orten im Opalinuston sehr selten.

Beurteilung der HSK

Generell sind die Untersuchungen der Nagra zu den lithologischen Eigenschaften des Wirtgesteins detailliert und von hoher wissenschaftlicher Qualität. Der Ton wurde nebst den eher spärlichen Oberflächenaufschlüssen in zahlreichen Bohrungen erschlossen und insbesondere in den Nagra-Bohrungen und im Felslabor Mont Terri eingehend charakterisiert.

Im Opalinuston treten lithologische Variationen auf, die ihre Ursache in sedimentären und diagenetischen Vorgängen haben. Eine genetische Interpretation dieser Variationen fehlt im Entsorgungsnachweis weitgehend. Sie könnte die Prognosen hinsichtlich der Geometrie und Verbreitung dieser Lagen verbessern und die stratigraphische Korrelation zwischen Bohrungen und Stollen erleichtern.

Die im Expertenbericht der Kommission Nukleare Entsorgung (KNE 2005) empfohlene bautechnische Optimierung - Bau des Lagers in einer lithologisch günstigeren Lage - aufgrund derartiger Studien wurde mit der Nagra diskutiert. Dabei ergab sich, dass eine Optimierung wenig Sinn macht, da die Stollen in jedem Fall in den mittleren Lagen des Opalinustons angelegt werden, damit die Ausbreitungswege im Ton möglichst lang sind. Aufgrund der lateralen Konstanz der einzelnen Faziesbereiche bringt somit eine lithologische Optimierung praktisch keine Vorteile.

2.2.4 Temperaturgeschichte des Opalinustons

Angaben der Nagra

Die Güte des Tongesteins als Ausbreitungsbarriere hängt von der Zusammensetzung der im Gestein vorkommenden Tonmineralien ab. Die Temperatur im Opalinuston beträgt auf der vorgesehenen Lagertiefe 38°C. Das heutige Tonmineralspektrum ist das Resultat der diagenetischen Entwicklung des Opalinustons im Verlaufe der Erdgeschichte. Der Temperaturverlauf während dieser Entwicklung ist dabei einer der wesentlichen Parameter. Mit den Kenntnissen dieser Temperaturgeschichte können Schlüsse auf das Verhalten des Tons bei der durch die Abfälle hervorgerufenen Wärmebelastung abgeleitet werden. Die Nagra hat deshalb die Temperaturgeschichte des Opalinustons mit einer breiten Palette von Untersuchungen abgeklärt. Dabei ergaben sich folgende Erkenntnisse:

- Der Opalinuston wurde im Verlauf seiner Entwicklungsgeschichte zweimal tief versenkt. Während der Kreidezeit, vor ca. 120 bis 65 Mio. Jahren, erreichte die Versenkung im Raum Benken-Weiach eine Tiefe von 1050 – 1100 m. Im Jungtertiär, vor rund 10 Mio. Jahren, erreichte die Versenkung 1650 – 1700 m. Die tertiäre Versenkung bestimmte den heutigen Kompaktionsgrad des Gesteins.
- Untersuchungen der organischen Geochemie zeigen, dass die Temperaturumkehr in der Kreide knapp vor der Bildung flüssiger Kohlenwasserstoffe („Ölfenster“) erfolgte. Als Maximaltemperatur ergibt sich für den Opalinuston im Zürcher Weinland ein Bereich von 59° bis 78°C.
- Auch Untersuchungen an Apatit-Spaltspuren weisen auf zwei Temperaturmaxima hin. Für das Kreide-Maximum ergaben sich 81° - 93°C. Obwohl die Versenkung im Jungtertiär tiefer war, erreichte die Temperatur maximal 66° - 88°C. Das höhere Temperatur-Maximum in der Kreidezeit lässt sich dadurch erklären, dass der Wärmefluss zu dieser Zeit grösser war und die Versenkung länger andauerte. Die Temperatur-Maxima aus den Spaltspuren-Untersuchungen sind leicht höher als die geochemisch ermittelten Werte; die Abweichungen liegen aber in der Bandbreite der methodischen Unsicherheit.
- Mit Beckenmodellierungen wurden die verschiedenen Datensätze, welche die Versenkungs- und Temperaturgeschichte charakterisieren, zu einem Gesamtbild vereinigt. Die verschiedenen Methoden, die hier einfließen (Stratigraphie, Vitrinit-Reflexion, organische Geochemie, Apatit-Spaltspuren), ergeben zusammen ein konsistentes Bild der Versenkungsgeschichte. Gemäss der Beckenmodellierung erreichte der Opalinuston im Gebiet Benken während der ersten Versenkungsphase in der Kreidezeit Maximaltemperaturen von ca. 85°C. Während des wesentlich kürzeren Temperaturpulses der jungtertiären Versenkung wurden wegen des geringeren Wärmeflusses lediglich 65°C erreicht.

Beurteilung der HSK

Die maximale Paläotemperatur ist eine wichtige Grösse bei der Beurteilung der Barriereneigenschaften des Wirtgesteins. Deshalb hat die HSK die Untersuchungen zur Versenkungsgeschichte durch die KNE begutachten lassen. Die KNE stellt fest, dass die Untersuchungen umfassend und aufwendig durchgeführt worden sind. Die verschiedenen Methoden liefern aufgrund der unterschiedlichen experimentellen Auslegung keine identischen Ergebnisse, deshalb sind auch die Aussagen der Nagra nicht ganz widerspruchsfrei. Die Spaltspu-

renanalyse einer Kristallin-Probe aus der Bohrung Benken ergab eine ähnliche Paläotemperatur wie Proben aus vergleichbarer Tiefenlage an den Flanken des südlichen Rheintalgrabens. Der Probe aus Benken kann deshalb eine hohe Zuverlässigkeit zugebilligt werden. Die Temperatur von 95° - 105°C für die 400 m tiefer als der Opalinuston entnommene Probe entspricht einer Temperatur von 75° - 85°C für den Opalinuston. Mit der heutigen Datenlage kann diesem Wert der maximalen Temperatur des Opalinustons eine hohe Zuverlässigkeit zugebilligt werden.

2.2.5 Lithologie der Rahmengesteine

Angaben der Nagra

Als Rahmengesteine bezeichnet die Nagra die überwiegend gering durchlässigen Gesteinspakete zwischen dem Wirtgestein Opalinuston und den regionalen Aquiferen über (Malm) und unter dem Ton (Muschelkalk). Sie bilden in vertikaler und auch in lateraler Richtung eine zusätzliche geologische Barriere. Im Zürcher Weinland beträgt die Mächtigkeit dieser Rahmengesteine über dem Opalinuston etwa 100 m, darunter rund 150 m. In die tonigen Rahmengesteine sind einzelne sandige, kalkige oder dolomitische Schichten eingeschaltet, die als potentiell wasserführende Horizonte gelten. In einem Fall (Stubensandstein) kann auch von einem geringmächtigen Aquifer gesprochen werden, dessen laterale Kontinuität allerdings beschränkt ist.

Schichten über dem Opalinuston

Murchisonae-Schichten: Diese direkt dem Opalinuston auflagernden Schichten sind sehr variabel ausgebildet. In der Bohrung Weiach und weiter westlich bestehen sie aus spätigen Kalken, eisenoolithischen Lagen sowie feinsandigen Tonsteinen. In der Region Benken wurden dunkle, kalkig-siltige bis feinsandige Tonsteine abgelagert. Sie sind in Aufschlüssen vom Opalinuston nicht abtrennbar, sie gehören deshalb lithostratigraphisch zum Opalinuston. In Benken muss darum die ganze tonige Abfolge bis zum Oberbeta-Oolith als Opalinuston bezeichnet werden.

Wedelsandstein-Formation (Sowerbi-Sauzei-Schichten): Es handelt sich in der Bohrung Benken um ca. 12 m sandige Mergel und mergelige, Biodetritus führende Sandsteine sowie ca. 18 m flaserige, siltige bis feinsandige Tonmergel mit eingeschalteten 30-80 cm mächtigen Bänken aus Kalksandstein oder sandigen Kalken. Die so genannten Blaukalke, die andernorts die Wedelsandstein-Formation gegen oben abschliessen (z.B. Mont Terri), sind im Zürcher Weinland nicht vorhanden. Aufgrund der 3D-Seismik (NTB 00-03) ist die beschriebene Gesteinsausbildung der Wedelsandstein-Formation für das ganze Gebiet typisch. Gegen Süden nehmen allerdings die Mächtigkeit sowie der Sand- und Kalkgehalt etwas ab.

Humphriesi-, Blagdeni- und Subfurcaten-Schichten: Diese bilden eine etwa 12 m mächtige kondensierte Abfolge aus eisenoolithischen Kalk- und Tonsteinen oberhalb des Wedelsandsteins. Die Schicht ist sehr variabel ausgebildet und schwankt stark in der Mächtigkeit (z.B. Bohrung Weiach 2.4 m).

Parkinsoni-, Württembergica- und Varians-Schichten: Diese Schichten entsprechen einer ca. 40 m mächtigen Serie siltiger bis feinsandiger Ton- oder Kalkmergel mit einzelnen 10 - 20 cm mächtigen flaserigen Kalkmergelbänken, die feinkörnigen Biodetritus enthalten. An der Basis liegen geringmächtige eisenooide führende Ton- und Kalkmergel.

Macrocephalus-Oolith, Anceps-Oolith und Glaukonitsandmergel: Diese geringmächtigen Schichten (Bohrung Benken: knapp 4 m mächtig) aus eisenoolithischen Tonsteinen und Kalken leiten zu den mergeligen Formationen des Unteren Malms über.

Effinger Schichten/Impressamergel: Im Gebiet Benken knapp 14 m mächtige Ton- und Kalkmergel mit eingeschalteten Kalkbänken. Die Schichten sind im Gebiet Benken vergleichsweise wenig mächtig und sehr kalkreich ausgebildet. Diese Schichten erwiesen sich als gering durchlässig und schliessen die Rahmengesteine gegen oben ab.

Hornbuck-Schichten bis Mittlere Malmmergel: Etwa 114 m mächtige Abfolge aus Kalken mit tonigen Schichtfugen und Lagen aus Tonmergel. In den Hornbuck-Schichten treten auch knollige Schwammkalke auf.

Malmkalke (Quaderkalk, Massenkalk, Plattenkalk): Gut gebankte, aber auch massige, dichte Kalke. Die Abfolge ist verkarstet und klüftig, sie bildet einen regionalen Aquifer über den Rahmengesteinen.

Schichten unter dem Opalinuston

Die Formationen des Lias sind in der Bohrung Benken gut 40 m mächtig. Die obersten 32 m (Lias Beta-Zeta) werden überwiegend von Tonsteinen, Tonmergeln und Mergeln gebildet, in die einzelne geringmächtige Kalkbänke eingelagert sind. Die ganze Abfolge ist praktisch undurchlässig. Im untersten Lias (Lias Alpha), treten generell eher kalkreiche Formationen auf. Der in der Bohrung Benken rund 4 m mächtige Arietenkalk gilt manchenorts als lokaler Aquifer. Die hydraulischen Tests in der Bohrung Benken charakterisierten ihn allerdings als dichtes Gestein.

Die Keuper-Formation wurde in der Bohrung Benken 119 m mächtig angetroffen. Es handelt sich zu einem grossen Teil um kontinentale Ablagerungen, die sehr wechselhaft ausgebildet sind. Diese Vielfalt an Gesteinen widerspiegelt die tektonische Unruhe, die zur Zeit der Ablagerung herrschte. Lithologisch handelt es sich meist um Tonsteine oder dolomitische Tonsteine sowie um mächtige Anhydritlagen. In diese feinkörnigen Abfolgen eingeschaltet sind Sandstein-Formationen (Schilfsandstein und Stubensandstein) und ein mariner Dolomit (Gansinger-Dolomit/Hauptsteinmergel), der während eines begrenzten Meeresvorstosses gebildet wurde. Die Nagra bezeichnet die Gesteinsreihe bis zum Top des Oberen Muschelkalkes (Trigonodus-Dolomit) als Rahmengesteine. Von den Sandstein-Formationen ist der Stubensandstein mit mehr als 11 m Mächtigkeit gut entwickelt. Mit einer erhöhten Durchlässigkeit spielt er eine Rolle als lokaler Aquifer.

Unter den tonreichen Schichten des Gipskeupers und der Lettenkohle liegt als regionaler Aquifer der Trigonodus-Dolomit. Er bildet zusammen mit dem Hauptmuschelkalk eine in der Bohrung Benken knapp 63 m mächtige Abfolge aus zerklüfteten, kavernösen Kalken und Dolomiten, die einen wichtigen Aquifer im Deckgebirge bilden.

Beurteilung der HSK

Die Charakterisierung der Schichten wurde von der Nagra sorgfältig vorgenommen. In der Sicherheitsanalyse zum Entsorgungsnachweis (NTB 02-05) hat sie die Rückhaltung von Radionukliden in den Rahmengesteinen konservativerweise nicht berücksichtigt. Das Rückhaltepotenzial der Rahmengesteine wurde jedoch für einige Szenarien abgeschätzt; es zeigte sich dabei, dass sie ein gutes Barrierenpotenzial haben. Die Schutzziele werden ohne diese Barriere eingehalten. Da die Rahmengesteine in der Sicherheitsanalyse nicht berücksichtigt wurden, wurde die Charakterisierung dieser Gesteine nicht mit dem gleichen Aufwand ausgeführt wie für das Wirtgestein. Im Falle der Fortführung des Projektes sollen diese gering durchlässigen Gesteinsabfolgen eingehender untersucht und beschrieben werden, um ihre Barrierenwirkung besser zu quantifizieren.

2.3 Tektonische Strukturen im Untersuchungsgebiet

2.3.1 Regionaler struktureller Aufbau

Angaben der Nagra

Die strukturelle Gliederung der Nordschweiz wurde zu einem wesentlichen Teil bereits im Paläozoikum angelegt. Im Tertiär kam es zu weiteren Phasen tektonischer Aktivität, die einerseits die alten Strukturen reaktivierten, andererseits mit dem Fernschub des Jura Gebirges neue Strukturen schuf. Die Nagra unterscheidet aufgrund dieser tektonischen Geschichte folgende Zonen:

- Das *Kristallinegebiet* des Schwarzwaldes.
- Den *Tafeljura*, der von der alpinen Fernschubtektonik nicht erfasst wurde.
- Die *Vorfaltenzone*, die im tieferen Untergrund durch den Fernschub schwach deformiert ist.
- Den *Faltenjura* als Gebiet, in dem der Fernschub sichtbar an die Erdoberfläche tritt.
- Die *abgescherte Molasse*, die zusammen mit den mesozoischen Schichten über dem Grundgebirgssockel nach Norden geschoben wurde.

Zwischen Tafeljura und Vorfaltenzone liegt somit die Grenze zwischen dem autochthonen Deckgebirge und dem alpin überprägten Deckgebirge.

Für das Gebiet Zürcher Weinland sind zwei regionale tektonische Strukturen besonders wichtig:

- Der *Freiburg-Bonndorf-Hegau-Bodensee-Graben*: Es handelt sich um eine komplexe Störungszone im Sockel, die aus mehreren Teilgräben besteht, die gestaffelt angeordnet sind. Die Struktur folgt der variskischen Richtung (NW-SE), die bereits paläozoisch entstand, aber bei der Bildung des Rheingraben-Riftsystems reaktiviert wurde. Für das Projekt im Zürcher Weinland ist vor allem der östliche Ast des Grabens von Bedeutung, der als Hegau-Bodensee-Graben bezeichnet wird. Die Störungen, die zu diesem Grabenteil gehören, werden weiter unten beschrieben.

- Der *Nordschweizer Permokarbondrog* (Weiach-Trog): Die wichtige Struktur, die WSW-ENE streicht, konnte mit Hilfe von Seismik und Bohrungen gut abgegrenzt werden. Die Randverwerfungen des Troges bildeten wichtige Leitlinien bei der tektonischen Entwicklung des Gebietes in der jüngeren Erdgeschichte. Das Baden-Irchel-Herdern-Lineament, welches den Südrand des Permokarbondroges nachzeichnet, war sowohl während des Mesozoikums als auch während des jüngeren Tertiärs aktiv.

Im Gebiet des *Tafeljuras* beschränkt sich das Störungsinventar auf zumeist steil stehende Zerrungsstrukturen (Abschiebungen). Sie verlaufen im Westen bevorzugt rheinisch (NNE-SSW). Sie entstanden im Zusammenhang mit der Bildung des Rheingrabens. Der östliche Tafeljura ist generell weniger von Brüchen zergliedert, die grösseren Störungen verlaufen hier mehrheitlich variskisch. Es fällt auf, dass je mächtiger die Schichten des Mesozoikums ausgebildet sind, desto weniger Strukturen treten an die Erdoberfläche, d.h. viele Verwerfungen keilen innerhalb des Gesteinspaketes aus. Dies ist auf eine zweiphasige tektonische Geschichte zurückzuführen, die mit Zerrungstektonik zur Zeit der oberen Trias begann. Viele dieser triassischen Brüche sind in der späteren tektonischen Entwicklung nicht mehr reaktiviert worden (Fig. 2.3-2). Bruchstrukturen, die die mesozoischen Schichten durchschlagen, gehen meist auch durch die Schichten der Molasse hindurch. Die mesozoischen Schichten des Zürcher Weinlands zeigten sich bei den seismischen Untersuchungen als nur wenig gestörtes, mit 2° bis 5° gegen SE abfallendes Deckgebirge in autochthoner Lage.

Im Gebiet des Hegau-Bodensee-Grabens mit seinen variskisch streichenden Störungen ist das Deckgebirge engmaschiger zergliedert. Die Nagra hat deshalb dieses Gebiet als eigenständige tektonische Einheit abgegrenzt. Wichtigste Struktur innerhalb der Grabenzone ist die Randen-Störung mit einem maximalen Versatz von rund 250 m. Sie erscheint nicht als einheitliche grosse Störungszone, sondern als Bündel von kleineren Verwerfungen die eine mehrere hundert Meter breite Störungszone bilden. Die Westbegrenzung der Hegau-Bodensee-Grabenzone bildet im Gebiet des Zürcher Weinlands die NW-SE streichende Neuhauser Störung. Sie stellt die nordöstliche Begrenzung des Untersuchungsgebietes dar. Ihr maximaler Versatz beträgt rund hundert Meter, dies allerdings ausserhalb des Untersuchungsgebietes. Sie hat im Untersuchungsgebiet den Charakter einer breit aufgefächerten Störungszone. Der Hegau-Bodensee-Graben, der in seinem nördlichen Teil die Vulkanbildungen des Hegaus einschliesst, endet im Süden an einer fast W-E streichenden Störung, der Schiener-Berg-Störung, welche die Bewegungsbeträge des Grabens aufnimmt. Über die Existenz eines weiter nach SE streichenden Bodensee-Grabens herrscht bei den Fachleuten keine einheitliche Meinung.

Beurteilung der HSK

Gute Kenntnisse des regionalen geologischen Rahmens sind eine Voraussetzung für die Erarbeitung der geologischen Langzeitszenarien. Der regionale strukturelle Aufbau des Untersuchungsgebietes wurde von der Nagra sorgfältig und umfassend untersucht. Der geologische Bau und das Inventar regionaler Störungen wurden mit Hilfe einer Kompilation bestehender Daten und mit der Analyse zahlreicher reflexionsseismischer Linien (2D-Seismik) zusammengestellt. Das regionale Untersuchungsgebiet umfasst die wichtigen Grossstrukturen, wie beispielsweise den Rheingraben, die das tektonische Geschehen im engeren Untersuchungsgebiet beeinflussen können.

Die KNE regt an (KNE 2005), dass im Rahmen zukünftiger Arbeiten nach Möglichkeit Untersuchungen in den nördlich angrenzenden Gebieten durchgeführt werden. Insbesondere sind Studien zur Entwicklungsgeschichte des heute noch tektonisch aktiven Hegau-Bodensee-Grabens zum besseren Verständnis dieses Gebiets angesprochen. Die HSK schliesst sich dieser Anregung an.

2.3.2 Lokales Störungsmuster

Angaben der Nagra

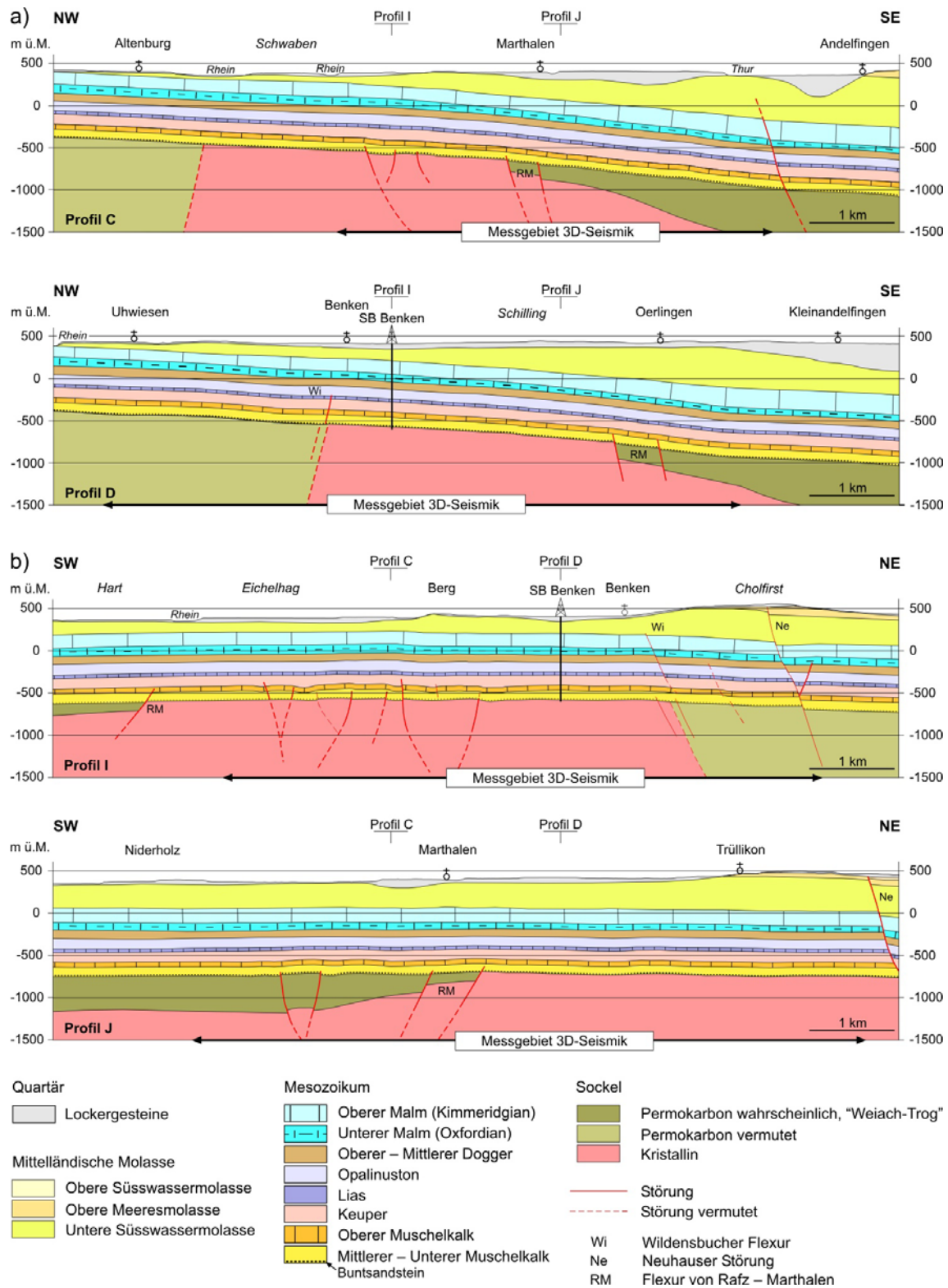
Das Zürcher Weinland ist Teil des Molassebecken-Nordrands, wo die NW-SE-streichenden Verwerfungen des Hegau-Bodensee-Grabens (Neuhauser Störung, Randen-Störung) mit den vorwiegend WSW-ENE streichenden Elementen des Molassebeckens (Flexur von Rafz-Marthalen, Rüdlinger Flexur, Baden-Irchel-Herdern-Lineament) interferieren (vgl. Fig. 2.2-2). Die Resultate der 3D-Seismik (NTB 00-03) zeigen, dass es sich bei diesen Elementen um ein Abbild der Verhältnisse im Sockel handelt. Die zwischen den Störungen liegenden Gebiete zeichnen sich durch eine ruhige Lagerung der mesozoischen Deckschichten aus. Man beobachtet eine Abnahme der tektonischen Strukturen, je jünger die Deckschichten sind. Der durch die alpine Kompression verursachte Fernschub des Deckgebirges hat ein jüngerer, vom Sockel entkoppeltes Strukturmuster geschaffen, das noch in den südlichen Teil des Untersuchungsgebiets Zürcher Weinland hineinreicht. Diese Erkenntnisse wurden mit Hilfe der seismischen Erkundungen gewonnen. An der Erdoberfläche sind die Störungen nicht erkennbar, sie liegen unter glazialen Ablagerungen oder noch tiefer.

Tektonische Strukturen

Die erwähnte 3D-Seismik bildet die Grundlage der strukturgeologischen Analysen. Kartierungen der Markerhorizonte geben eine gute räumliche Vorstellung des geologischen Baus. Limitierender Faktor ist dabei die Auflösungsgenauigkeit der seismischen Daten. Für das gewählte Tiefenintervall von 250 bis 1200 m unter Terrain wurde festgestellt, dass ein Versatz der Schichten um 10 m noch abgebildet wird. Mittels Analysen der seismischen Signale (Attributanalysen) können weitere Details des strukturgeologischen Aufbaus gewonnen werden.

Im Projektgebiet hat die Nagra die folgenden tektonischen Strukturen beschrieben:

- Die *Hochzone von Benken*, ein etwa 3 km breites, etwa W-E verlaufendes Gebiet, in dem das Deckgebirge auf kristallinem Grundgebirge liegt. Südlich und nördlich davon werden Permokarbon-Tröge vermutet (Fig. 2.3-1).
- Die *Flexur von Rafz-Marthalen* grenzt die Hochzone von Benken im Süden gegen den Permokarbondrog ab. Sie verläuft innerhalb des Untersuchungsgebietes und ist einige hundert Meter breit. Sie verdankt ihre Entstehung der Reaktivierung trogparalleler Bruchzonen im Grundgebirge.
- Die *Strukturzone von Niderholz* verläuft im Westteil des Untersuchungsgebietes in N-S-Richtung und ist demnach ein rheinisches Element. Sie besteht aus zahlreichen kurzen, steilstehenden Verwerfungen, die vom Sockel in das untere Mesozoikum ziehen. Im höheren Mesozoikum sind keine Deformationen feststellbar.



Figur 2.3-1: Geologische Profile durch das Gebiet des Zürcher Weinlands (aus NTB 02-03).

- Die *Strukturzone von Trüllikon* ist eine ebenfalls auf die tieferen mesozoischen Schichten beschränkte N-S-streichende Verwerfungszone im Osten des 3D-Seismik-Gebietes.
- Die *Wildensbucher Flexur* ist eine W-E verlaufende Struktur. Sie setzt sich aus mehreren stufenartig („en échelon“) angeordneten, 300–900 m langen Teilsegmenten zusammen. Da im Bereich der Flexurzone die Schichten entgegen dem regionalen Trend einfallen, wird die Zone vor allem aufgrund einer Auswertung der seismischen Signale (Attributkarten) deutlich abgebildet. Der maximale Versatz zwischen Tief- und Hochscholle beträgt auf dem Niveau des Opalinustons rund 20 m.
- Die *Neuhauser Störung* kann anhand von Oberflächenaufschlüssen weiter nördlich kartiert werden. Sie bildet die NE-Grenze des Untersuchungsgebietes und trennt das Untersuchungsgebiet vom Hegau-Bodensee-Graben ab. Sie ist im gesamten Schichtpaket als Verwerfung erkennbar. Der Versatz auf Höhe des Opalinustons beträgt etwa 40 m. Nach den Seismik-Aufnahmen handelt es sich um Abschiebungsflächen, die mit 70°-80° einfallen. Ausserhalb des Untersuchungsgebietes wurden auch Hinweise auf eine laterale Verschiebungskomponente gefunden.

Es gibt einige wenige Hinweise auf *neogene, kompressive Strukturen* im Deckgebirge. Das bestehende kompressive Spannungsfeld im Deckgebirge besteht seit gut 10 Mio. Jahren und bewirkte die Auffaltung des Jura-gebirges. In der 3D-Seismik und den Kernen der Bohrung Benken finden sich geringe Anzeichen kompressiver Deformationen in den evaporitischen Schichten der Anhydritgruppe und des Gipskeupers, die als embryonale Abscherstrukturen gedeutet werden können. Spannungsmessungen im Bohrloch, Strukturanalysen an Bohrkernen sowie die Analyse von Horizontalstylolithen (Bürgin 2000) bestätigen die Existenz eines kompressiven Spannungsfeldes im Gebiet Zürcher Weinland. Der Nordrand des abgescherten Deckgebirges resp. des Fernschubs, dürfte demnach im Bereich der Flexur von Rafz-Marthalen liegen.

Bewegungsgeschichte

Das Studium der tektonischen Bewegungen an den Strukturelementen des Untersuchungsgebietes erlaubt wichtige Schlussfolgerungen zur Bewegungsgeschichte des Gebietes. Das Strukturmuster, welches heute an der Basis der mesozoischen Schichten beobachtet wird, ist durch eine Reaktivierung der alten paläozoischen Strukturen entstanden. Zu diesen Strukturen gehören alle grösseren Störungszonen des Untersuchungsgebietes.

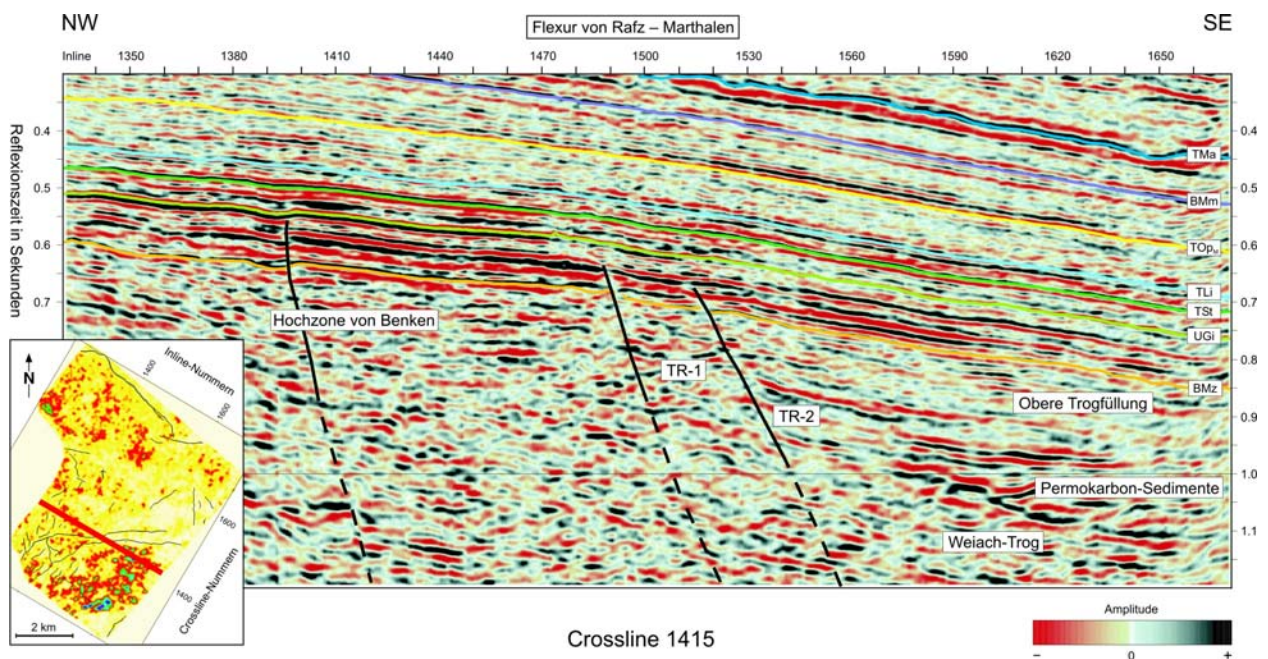
Die Erkenntnisse der geologischen Entwicklungsgeschichte des tektonischen Strukturmusters der Nordschweiz sind in Fig. 2.2-1 zusammengefasst:

Bereits im Paläozoikum wurde das kristalline Grundgebirge im Verlauf der variskischen Gebirgsbildung mit zahlreichen Störungen durchzogen und es kam zur Bildung ausgedehnter Permokarbontröge. Dieses paläozoische Blockmuster wurde im Mesozoikum, im Zeitraum mittlere Trias bis Lias reaktiviert. Die reaktivierten Bruchstrukturen sind auf der 3D-Seismik daran erkennbar, dass sie sich nur bis in den Bereich des Keupers erstrecken; darüber liegen die jüngeren Sedimentschichten praktisch ungestört (Fig. 2.3-2).

Im weiteren Verlauf des Mesozoikums und der unteren Kreide war die tektonische Aktivität in Mitteleuropa bescheiden, sie hat in den Sedimentgesteinen des Zürcher Weinlandes nur geringe Spuren hinterlassen. Unterschiedliche Sedimentmächtigkeiten lassen auf örtlich differenzierte Sedimentation schliessen, die möglicherweise auf begrenzte Bewegungen an

Brüchen zurückgeht. Das markanteste Ereignis dieser Phase war aber das allmähliche Einsinken der Kontinentalschelfe, das im Zeitraum Basis Trias bis Oberkreide gut 1400 m erreichte.

Danach setzte in der späten Kreide in Südwestdeutschland eine grossräumige Hebung mit Abtragung ein (Schwarzwald-Vogesen- oder Rheindom). Es ist anzunehmen, dass dabei wiederum einige Störungen reaktiviert wurden, vor allem im Zentrum der Hebung weit nördlich des Zürcher Weinlands. Erst spät im Tertiär wurde das Gebiet der Nordschweiz erneut tektonisch überprägt. Dabei wurden vor allem die zahlreichen Flexuren über alten Grundgebirgsstörungen geschaffen. Wiederum hielten sich die tektonischen Kräfte an die alten vorgezeichneten Lineamente im Grundgebirge. Figur 4.2-10 aus NTB 02-03 (Strukturkarte Top Malm) zeigt die im Tertiär reaktivierten Störungen des Untersuchungsgebietes. Der Vergleich dieser Karte mit den Karten der tiefer liegenden Horizonte zeigt eindrücklich, dass sich die tektonischen Vorgänge weitgehend an das ererbte Blockmuster aus dem Paläozoikum hielten.



Figur 2.3-2: 3D-Seismik, Crossline 1415 zeigt die Trograndstörungen (TR-1 und TR-2) und die südliche Störung der Hochzone Benken. Die Störungen sind nur bis in den Bereich des Keupers entwickelt, darüber verlaufen die jüngeren Schichten ungestört (aus NTB 02-03).

Spät im Tertiär (Miozän-Pliozän) griff die alpine Gebirgsbildung mit dem Fernschub des Jura-gebirges bis in die nördlichen Gebiete der Schweiz. Die Abscherung des Deckgebirges vom Grundgebirgssockel erreichte den südlichsten Teil des Untersuchungsgebietes Zürcher Weinland. Der Nordrand des Fernschubes könnte damit etwas weiter nördlich liegen, als dies seinerzeit bei der Gebietswahl vermutet wurde. Auswirkungen dieser Vorgänge auf den Zustand des Opalinustons des engeren Untersuchungsgebietes wurden allerdings keine erkannt.

Die Entwicklungsgeschichte des Gebietes zeigt, dass nach einer ersten Zerblockung des Grundgebirgssockels im Paläozoikum sich die späteren tektonischen Vorgänge auf die alten Strukturen konzentrierten, d.h. die tektonischen Kräfte wurden an den bestehenden Störungszonen abgebaut. Da das gegenwärtig herrschende Spannungsfeld mindestens seit dem Ende der Molassesedimentation vor rund 12 Mio. Jahren konstant ist und keine Vorgänge erkennbar sind, die dies kurzfristig ändern könnten, kann angenommen werden, dass es sich auch im Zeitraum der kommenden Million Jahre nicht wesentlich verändern wird.

Bei der Ausarbeitung von Langzeitszenarien muss beurteilt werden, welche Störungen ein Potenzial für junge Bewegungen haben. Die Analyse des Störungsmusters im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland ergab, dass bei zwei Störungen junge Bewegungen möglich sind. Es sind dies die Randen-Störung und die Neuhauser Störung. An der Randen-Störung ereigneten sich 1995/96 mehrere schwache Erdbeben, die diese junge Aktivität belegen. Beide Störungen sind im Rahmen der oben erwähnten tektonischen Wiederbelebung der alten paläozoischen Strukturen im Miozän entstanden. Die Nagra hat die Störungen eingehend untersucht und dabei festgestellt, dass die Bewegungswerte über den Zeitraum seit dem mittleren Miozän (ca. 20 Mio. Jahre) sehr gering ausfallen, da in diesem Zeitraum lediglich Vertikalversätze von 100 und 200 m erreicht wurden. Bei der Neuhauser Störung konnte eine gewisse Aktivität mit den Nivellementmessungen nachgewiesen werden, indem der nördliche Block absinkt, der südliche hingegen sich hebt. Die Versetzungsrate liegt dabei aber wesentlich unter 0.1 mm/Jahr. Die kleinen Bewegungsraten kommen auch dadurch zum Ausdruck, dass die Störungen bei den Luftbildanalysen der Universität Bern als neotektonisch inaktiv bezeichnet wurden (Pfiffner et al. 2001).

Bei den Langzeitanalysen im Rahmen der Sicherheitsbetrachtungen wird die Neuhauser-Störung im Sinne einer pessimistischen Interpretation als potenziell aktive Störung betrachtet. Ein allfälliges Tiefenlager müsste darum in jedem Fall einen Abstand von mindestens 200 m von dieser Störung einhalten. Der mit der Neuhauser-Störung in Zusammenhang stehenden Wildensbucher Flexur würde bei der Platzierung der Lager-Stollen ausgewichen.

Beurteilung der HSK

Die Nagra hat das Störungsmuster im Untersuchungsgebiet sorgfältig untersucht. Die umfangreichen Abklärungen mit 3D-Seismik erlauben eine hochauflösende Abbildung der tektonischen Verhältnisse. Die entsprechenden Daten führen zu einer Interpretation des Ablaufs der tektonischen Entwicklung, die für die Erstellung von geologischen Entwicklungsszenarien grundlegend ist. Wichtig ist der Befund, dass sich die tektonische Wiederbelebung im Miozän auf die alten paläozoischen Strukturen konzentrierte. Da das Spannungsfeld im Untersuchungsgebiet sich seit jenem Zeitpunkt nicht wesentlich geändert hat und im betrachteten Zukunftsintervall von 1 Million Jahren sich auch nicht grundlegend verändern wird, ist die Annahme der Nagra gerechtfertigt, dass sich allfällige zukünftige tektonische Bewegungen an den bekannten, auch heute als aktiv geltenden Störungen abspielen werden.

2.3.3 Deformation des Wirtgesteinskörpers

Angaben der Nagra

Deformationsstrukturen sind im Opalinuston selten. Die Nagra hat darum ein verhältnismässig grosses Gebiet in die Erhebung eines entsprechenden Datensatzes einbezogen. Nebst der sehr intensiv beprobten Bohrung Benken wurden auch frühere Nagra-Bohrungen

berücksichtigt. Beobachtungen an Aufschlüssen in Tongruben und im Felslabor Mont Terri brachten weitere Erkenntnisse zu den Sprödstrukturen im Tongestein (Mazurek 2001).

Im Opalinuston der Bohrung Benken wurden nur sehr wenige Sprödstrukturen beobachtet. Neben vereinzelt Verschiebungsflächen und drei max. 2 mm mächtigen, stets vollständig verfüllten und nicht reaktivierten Kalzit-Adern wurde eine einzige, etwa 10 cm mächtige Störung durchteuft (NTB 02-03 Fig. 5.5-1). Sie zeigt Verschiebungsflächen mit Gesteinsbruchstücken und einigen kleinen Klüften. Alle Klüfte im Opalinuston stehen im Zusammenhang zu Scherstrukturen (Verschiebungsflächen, Störungen). Hydraulische Tests zeigten keine erhöhte Durchlässigkeit gegenüber dem ungestörten Opalinuston. In der Bohrung Weiach waren Sprödstrukturen im Opalinuston etwas häufiger als in Benken, aber auch hier war die Klufthäufigkeit im Opalinuston im Vergleich zu den Umgebungsgesteinen minimal.

Für die Charakterisierung steilstehender Strukturen wurden Oberflächenaufschlüsse untersucht. In den Tongruben von Siblingen, Erzingen und Schinznach wurden dabei nur wenige tektonische Strukturen im Tongestein gefunden. Eine etwa 0.5 m mächtige Störungszone in der Tongrube Siblingen wurde sehr detailliert untersucht und beschrieben (Mazurek 2001). Beobachtungen im Felslabor Mont Terri ergänzen diese Feldaufnahmen. Insbesondere konnte dort eine ca. 1 m mächtige Überschiebungszone detailliert untersucht und auch hydraulisch getestet werden.

Alle beschriebenen Störungen haben einen ähnlichen Aufbau: Ein zentraler Bereich mit einer Störungsbrekzie wird beidseits von parallelen Scherflächen begrenzt, die eine Zone mit aufgelockertem, zerüttetem Tonmaterial einschliessen. In diesem Bereich ist teilweise auch eine schwache Klüftung erkennbar, die als Auflockerungszone interpretiert wird. Mineralisierungen von Störungszonen kommen nur sehr selten und in volumetrisch unbedeutenden Mengen vor (< 1 Vol-%). Es wird daraus geschlossen, dass die Deformation mit wenig Dilatanz verbunden war und bei bedeutender Überlast ablief. Mineralogisch sind das gestörte Gestein und der ungestörte Opalinuston nahezu identisch. Vor allem in sandig-karbonatischen Lagen können cm-dicke Kalzit-Adern vorkommen; im ungestörten Gestein sind sie extrem selten und höchstens einige Millimeter dick.

Eine regionale Betrachtung der Sprödstrukturen im Opalinuston zeigte, dass diese gegen Westen zunehmen, vor allem in den unteren, tonigen Lagen des Opalinustons. Dies ist möglicherweise auf den Fernschub zurückzuführen. Aus diesem Blickwinkel wird die geringe Klufthäufigkeit in der Bohrung Benken verständlich. Angesichts des Fehlens von Kleinstrukturen im mm- bis dm-Bereich sind die mechanischen Schwachstellen des Opalinustons bei einer Bruch- oder Rissbildung vor allem die Schichtflächen oder Störungszonen.

Die Frage des Ablaufs der Kluft- und Ader-Bildung wurde in den Berichten der Nagra mehrfach untersucht. Dabei hat sich auch die Interpretation dieser Strukturen geändert. Gingen frühe Studien davon aus, dass die kalzitischen Adern und Klüfte auf hydrothermale Vorgänge während der Versenkungsphase zurückzuführen seien (Bläsi et al. 1999), zeigten spätere Untersuchungen, dass diese isoliert im Gestein liegenden Strukturen auf Drucklösungsvorgänge während der Diagenese zurückgeführt werden müssen (Mazurek 2001).

Beurteilung der HSK

Die Untersuchungen der Nagra haben gezeigt, dass der Opalinuston im Zürcher Weinland nur wenige Deformationsstrukturen wie Klüfte und Störungszonen enthält. Im Felslabor Mont

Terri, welches im Schenkel einer Falte des Juragebirges angelegt wurde, sind dementsprechend mehr Sprödstrukturen entwickelt. Wichtig ist, dass offene Klüfte fehlen und dass mit Kalzit/Fe-Kalzit gefüllte Klüfte und Adern in der Bohrung Benken nur sehr selten auftreten. Die Kalzit-Klüfte und Adern liegen als isolierte Körper in der Tonmatrix. Sie entstanden durch kleinräumige Stoffwanderungen (Sammelkristallisation bei Drucklösung) und nicht durch formationsübergreifenden Lösungstransport bei hydrothermalen Vorgängen.

Der Opalinuston in den Bohrungen Benken und Weiach zeichnet sich durch eine geringe Zahl tektonischer Strukturen aus. In den weiter westlich liegenden Nagra-Bohrungen Riniken und Schafisheim waren vor allem die unteren Abschnitte des Opalinustons zerschert. Gleiches gilt für die Verhältnisse im Felslabor Mont Terri. Die hydraulischen Tests der tektonisch belasteten Zonen ergaben aber überall Durchlässigkeiten, die sich nicht vom ungestörten Opalinuston unterschieden. Die umfangreichen Ergebnisse zum Störungsinventar und dessen hydraulischer Bedeutung geben genügend Grundlagen zur Beurteilung dieses Aspektes im Rahmen des Standortnachweises.

2.4 Hydrogeologie

Für die Beurteilung der Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers sind die hydrogeologischen Verhältnisse von zentraler Bedeutung, da sie wichtige Rahmenbedingungen für die Freisetzung der Radionuklide aus dem Lager und für die Ausbreitung in der Geosphäre definieren. Die Nagra hat deshalb umfangreiche Untersuchungen zur hydrogeologischen Charakterisierung der Schichtabfolge und zur Erfassung der Grundwasserfließverhältnisse im Zürcher Weinland durchgeführt und die Ergebnisse in der Geosynthese (NTB 02-03, Kap. 6) dokumentiert. Im folgenden Abschnitt werden die Durchlässigkeitsverhältnisse und die hydrogeologische Gliederung der Schichtfolge, die Fließverhältnisse, die Hydrochemie und Verweilzeiten der Tiefengrundwässer diskutiert und beurteilt. Anschliessend wird die Quantifizierung der Wasserfließraten für die Nuklidfreisetzung aus dem Tiefenlager dargelegt und bewertet. Zur Klärung von Schlüsselfragen hat die HSK Experten der Kommission Nukleare Entsorgung und der Fachgruppe Ingenieurgeologie der ETH-Zürich beigezogen, deren Beurteilungen hier eingeflossen sind.

2.4.1 Durchlässigkeitsverhältnisse und hydrogeologische Gliederung

Angaben der Nagra

Die Nagra hat aufgrund der Durchlässigkeitsmessungen und der lithostratigraphischen Befunde der Bohrung Benken sowie regionaler Datensätze für die Schichtfolge im Zürcher Weinland eine hydrogeologische Gliederung in 12 Einheiten vorgenommen, wobei Abfolgen mit vergleichbaren hydrogeologischen Eigenschaften (Durchlässigkeit, Porosität, Fließwege) jeweils als eine hydrogeologische Einheit ausgeschieden wurden. Tabelle 2.4-1 zeigt die Gliederung, wie sie für die Schichtreihe vom Quartär bis zum Oberen Muschelkalk abgeleitet wurde.

Tabelle 2.4-1: Hydrogeologische Gliederung der Schichtreihe Zürcher Weinland
(aus NTB 02-03).

K_h = Durchlässigkeit horizontal, K_v = Durchlässigkeit vertikal.

Hydrogeologische Einheit	Effektive hydraulische Durchlässigkeit K (m/s)	Bemerkungen
1. Quartär (0 – 68 m)	$K_{\text{mittel}} = 1 \cdot 10^{-4}$	Lockergesteinsaquifer: Variable Mächtigkeit, heterogene K -Verteilung, lokal auch geringdurchlässig (Tonablagerungen).
2. Tertiär (68 – 199 m)	$K_h = 1 \cdot 10^{-7}$ $K_v = 1 \cdot 10^{-9}$	USM: Wasserführung in Sandsteinrinnen möglich. Anisotropie durch Sandstein-Mergel-Abfolge.
3. Malm-Aquifer (199 – 437 m)	$K_{\text{mittel}} = 5 \cdot 10^{-7}$	Aquifer: Regionaler Karst- bzw. Kluftaquifer, in Benken nur mässig durchlässig.
4. Malm-Dogger Mergel (437 – 508 m)	$K_{\text{mittel}} = 1 \cdot 10^{-12}$	Aquitard: Wechsellagerungen von tonig-mergeligen und sandig-kalkigen Gesteinen, Tonanteil generell recht hoch.
5. Wedelsandstein (508 – 539 m)	$K_h = 1 \cdot 10^{-10}$ $K_v = 1 \cdot 10^{-11}$	Sandig-kalkige Wechsellagerungen, lokal erhöhte Wasserführung möglich, in Benken gering durchlässig.
6. Opalinuston (539 – 652 m)	$K_h = 1 \cdot 10^{-13}$ $K_v = 2 \cdot 10^{-14}$	Aquitard: Tonstein (Pelit) mit eingeschalteten Silt- und Feinsandlagen.
7. toniger Lias (652 – 684 m)	$K_h = 1 \cdot 10^{-13}$ $K_v = 2 \cdot 10^{-14}$	Aquitard: Mit vergleichbaren Eigenschaften wie der Opalinuston.
8. Arietenkalk (684 – 688 m)	$K_{\text{mittel}} = 1 \cdot 10^{-10}$	Formation mit potenziell erhöhter Wasserführung.
9. Lias-Keuper Tonsteine (688 – 709 m)	$K_h = 1 \cdot 10^{-11}$ $K_v = 1 \cdot 10^{-12}$	Aquitard: tonig-mergelige und kalkig-dolomitische Lagen, Heterogenität durch laterale Fazieswechsel.
10. Sandsteinkeuper (709 – 736 m)	$K_{\text{mittel}} = 5 \cdot 10^{-9}$	Aquifer: Mit Sandsteinformationen von ungeklärter räumlicher Erstreckung.
11. Gipskeuper und Lettenkohle (736-811 m)	$K_{\text{mittel}} = 1 \cdot 10^{-14}$	Aquitard: Trennt den Sandsteinkeuper wirksam vom Muschelkalk-Aquifer.
12. Muschelkalkaquifer (811-886 m)	$K_{\text{mittel}} = 1 \cdot 10^{-6}$	Aquifer: von regionaler Bedeutung mit hoher Durchlässigkeit.

Grundsätzlich unterscheidet die Nagra zwischen Grundwasserleitern (Aquiferen) und Grundwasserstauern (Aquitarden). Die höchsten Durchlässigkeiten weisen neben den quartären Schottergrundwasserleitern ($K_{\text{mittel}} = 10^{-4}$ m/s) die beiden regionalen Aquifere Malm und Muschelkalk auf (K-Werte von 10^{-7} bzw. 10^{-6} m/s). Die Malm-Dogger-Mergel, der Opalinuston, der tonige Lias, die Lias-Keuper-Tonsteine und der Gipskeuper zeichnen sich durch eine sehr geringe Durchlässigkeit aus und stellen hydraulische Barrieren dar (Aquitarden).

Der Opalinuston weist in der Bohrung Benken nur wenig variierende K-Werte zwischen 10^{-14} vertikal und 10^{-13} m/s horizontal auf. Die Aquitarden zeichnen sich gegenüber den regionalen Aquiferen durch eine 10'000- bis 10'000'000-fach geringere Durchlässigkeit aus. Dieser starke Kontrast führt zu einer ausgeprägten vertikalen hydraulischen Trennung der Grundwasserleiter in unterschiedliche Grundwasserstockwerke.

Für die Sicherheitsbetrachtung unterteilt die Nagra die Schichtreihe in drei Systemkomponenten, wobei der Opalinuston (Einheit 6) als primäre geologische Barriere, die Einheiten 4 und 5 (obere Rahmengesteine) sowie 7 bis 11 (untere Rahmengesteine) als sekundäre geologische Barriere mit zum Teil möglichen lokalen Fließpfaden (Wedelsandstein, Sandsteinkeuper) und die Einheiten 3 und 12 als regionale Aquifere betrachtet wurden.

Der Opalinuston wirkt infolge der sehr niedrigen Durchlässigkeit als ausgeprägte hydraulische Barriere. Aus dem Vergleich der hydraulischen Durchlässigkeitswerte und der im Labor bestimmten Diffusionskonstanten ($D_e = 10^{-12}$ bis 10^{-10} m²/s) sowie hydrochemischen Evidenzen schliesst die Nagra, dass Diffusion der massgebende Transportprozess im Opalinuston ist. Die vertikalen Durchlässigkeiten des Opalinustons sind aufgrund der ausgeprägten sedimentologisch-diagenetisch angelegten Anisotropie geringer als die horizontalen Durchlässigkeiten. Nach Labortests ist K_v 2- bis 6-mal geringer als K_h .

Im Opalinuston wurden in der Bohrung Benken hydraulische Überdrücke beobachtet, welche als Relikte der Versenkungsgeschichte oder als Resultat der tektonischen kompressiven Gebirgsspannung interpretiert werden. Mittels Modellrechnungen zeigt die Nagra, dass Überdrücke nur dann über geologische Zeiträume erhalten bleiben können, wenn die Gesteinsdurchlässigkeit noch geringer ist, als aus den hydraulischen Tests abgeleitet wurde ($K < 10^{-15}$ m/s). Die Nagra betrachtet deshalb die Überdrücke als ein weiteres Indiz für die sehr geringen Durchlässigkeiten des Opalinustons.

In der Bohrung Benken zeichnet sich der Sandsteinkeuper durch eine vergleichsweise hohe Durchlässigkeit aus, wobei sich die Transmissivität hauptsächlich auf die wenige Meter mächtige poröse Dolomitbrekzie des Stubensandsteines konzentriert. Die hydrogeologische Einordnung des Wedelsandsteines beurteilt die Nagra wegen der geringen Datenbasis als schwierig und unklar. In der Bohrung Benken weist der Wedelsandstein eine niedrige Durchlässigkeit ($K = 4 \cdot 10^{-12}$ m/s) auf. Wegen der auffällig tiefen hydraulischen Druckhöhe, die in der Bohrung Benken beobachtet wurde, ordnet die Nagra dieser Formation konservativerweise eine gewisse Wasserwegsamkeit zu.

Beurteilung der HSK

Aufgrund der vorgelegten Datengrundlage beurteilt die HSK die hydrogeologische Gliederung der Schichtreihe des Zürcher Weinlands als nachvollziehbar und plausibel. Die abgeleiteten Durchlässigkeitsverhältnisse stützen sich neben den Messungen der Bohrung Ben-

ken auch auf Daten weiterer Bohrungen der Nordschweiz ab. Bei der Charakterisierung der hydrogeologischen Einheiten hat die Nagra jene Sedimentformationen vertieft untersucht, welche im Rahmen der Langzeitsicherheit als geologische Barrieren (Opalinuston und Rahmengesteine) oder als mögliche Freisetzungspfade von besonderer Bedeutung sind. Der Schwerpunkt der Untersuchungen wurde entsprechend auf die Beschaffenheit und das Einschlussvermögen des Opalinustons, auf die beiden wichtigsten regionalen Aquifere (Malm- und Muschelkalk) und auf die potentiell wasserführenden Formationen in unmittelbarer Umgebung des Wirtgesteins (Wedelsandstein und Sandsteinkeuper) gelegt. Auf die unterhalb des Muschelkalk-Aquifers liegenden Grundwasserleiter Buntsandstein und das obere kristalline Grundgebirge geht die Nagra nicht weiter ein, da diese hydraulisch von den oberen Grundwasserstockwerken entkoppelt und für die Sicherheitsbetrachtung nicht massgebend sind. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsschwerpunkte im Detail besprochen und beurteilt.

Durchlässigkeit und Einschlussvermögen des Opalinustons

Die Bestimmung der Durchlässigkeit des Opalinustons erfolgte einerseits mittels hydraulischer Packertests in der Bohrung Benken, andererseits wurden Durchlässigkeitsmessungen an Bohrkernproben im Labor durchgeführt. In einer vertikalen Bohrung wird bei horizontalen Lagerungsverhältnissen der Schichtabfolgen grundsätzlich die Durchlässigkeit parallel zur Schichtung erfasst (K_h -Wert). Die Durchlässigkeitsbestimmung senkrecht zur Schichtung (K_v) erfolgte an Bohrkernproben im Labor. Die in der Bohrung Benken ermittelten K_h -Werte liegen zwischen $1 \cdot 10^{-14}$ und $6 \cdot 10^{-14}$ m/s mit einem Unsicherheitsbereich von $1 \cdot 10^{-15}$ bis $1 \cdot 10^{-13}$ m/s. Permeametertests an Bohrkernproben haben K_h -Werte von 3 bis $6 \cdot 10^{-14}$ m/s und K_v -Werte von 0.6 bis $3 \cdot 10^{-14}$ m/s ergeben. Die hydraulischen Tests der Bohrung Benken wurden von der Nagra einer vertieften Analyse zur Erkennung möglicher Störeffekte (Osmose, Quellung, Bohrlochkonvergenz) unterzogen. Die Berücksichtigung der aufgeführten Effekte führt im Vergleich zur ersten Auswertung (NTB 00-01) zu noch geringeren K-Werten (Faktor 2 bis 5). Aus Sicht der HSK kann festgehalten werden, dass die Tests mit einer hohen Professionalität und nach dem internationalen Stand der Technik durchgeführt wurden. Die vorgelegten K-Werte und aufgeführten Unsicherheits-Bandbreiten der Messwerte können deshalb als zuverlässig und gesichert betrachtet werden.

Neben diesen Daten stützt sich die Nagra auf Durchlässigkeitsbestimmungen im Opalinuston weiterer Tiefbohrungen (Weiach, Riniken und Schafisheim), die mit K-Werten von $5 \cdot 10^{-14}$ bis $4 \cdot 10^{-13}$ m/s vergleichbare Resultate geliefert haben. Im Felslabor Mont Terri, wo Untersuchungen an grossräumigen Gebirgsbereichen des Tunnelsystems möglich sind und hydraulische Messungen aus über 90 Bohrungen vorliegen, ist der Variationsbereich der Durchlässigkeitswerte im Opalinuston etwas grösser (K_h von $2 \cdot 10^{-14}$ bis $2 \cdot 10^{-12}$ m/s), was mit der höheren Porosität, der unterschiedlichen Versenkungsgeschichte und den lokalen in-situ Bedingungen am Mont Terri erklärt wird.

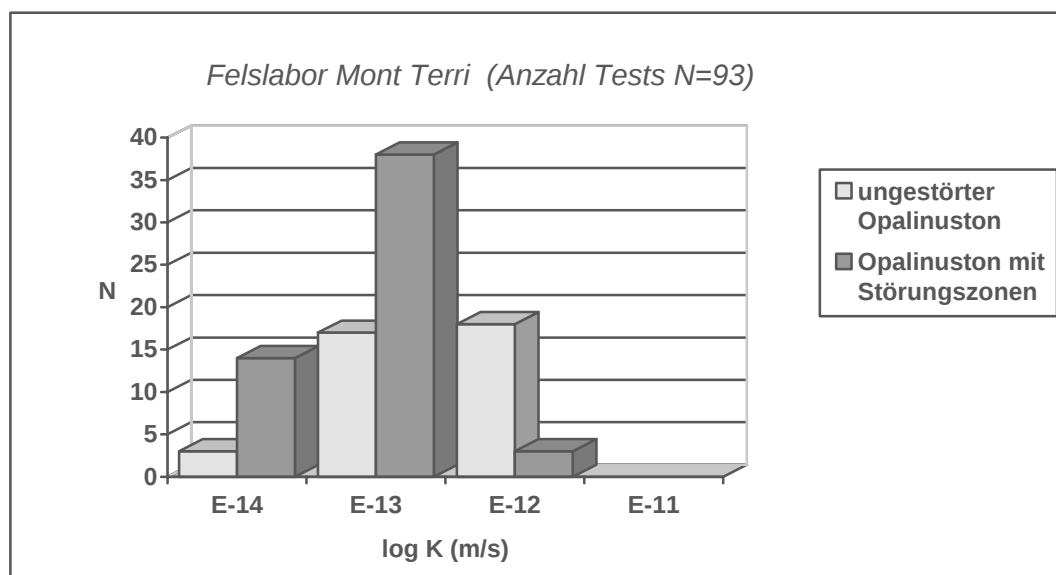
Die Bedeutung einer Durchlässigkeit von 10^{-14} m/s wird hier durch einige Vergleiche illustriert. Ein K-Wert von 10^{-14} m/s entspricht einem Wasserfluss von 0.3 cm^3 oder rund zehn grossen Wassertropfen pro Jahr durch einen gesättigten Gesteinskörper mit einem Volumen von einem Kubikmeter bei einem hydraulischen Gradienten von eins (ein Meter Druckdifferenzabbau pro Meter Fliessdistanz). Als Fliessgeschwindigkeit ausgedrückt bedeutet diese Durchlässigkeit, dass das Wasser bei einer Gesteinsporosität von 12 % und einem hydraulischen Gradienten von eins in einem Jahr eine durchschnittliche Distanz von rund

3 Tausendstel mm zurücklegt. Um 50 m Opalinuston zu durchfliessen benötigt das Wasser dementsprechend eine Zeit von rund 19 Mio. Jahren. Der advective Transport von Wasser durch den Opalinuston ist damit äusserst langsam.

Transmissivität tektonischer Trennflächen im Opalinuston

In der Bohrung Benken wurden im Opalinuston 8 makroskopisch erkennbare Klüfte angetroffen, die als Begleitgefüge von Störungen und Verschiebungsflächen (Scherklüften) interpretiert werden. Die hydraulischen Tests der Bohrung Benken weisen darauf hin, dass diese tektonischen Strukturen keine signifikant höhere Durchlässigkeit aufweisen als das ungestörte Nebengestein.

Diese Feststellung wird durch umfangreiche in-situ Messungen im Felslabor Mont Terri gestützt, wo hydraulische Tests in stark tektonisiertem Opalinuston (Störungszonen) keine erhöhten Durchlässigkeiten gegenüber dem ungestörten Gestein erkennen lassen (Fig. 2.4-1).



Figur 2.4-1: Histogramm der im Felslabor Mont Terri im Opalinuston gemessenen Durchlässigkeitswerte (Nussbaum und Bossart 2004).

Für die Beurteilung der Durchlässigkeiten tektonischer Strukturen im Opalinuston hat die Nagra ferner eine hydrogeologische Studie in verschiedenen Untertagebauwerken (Eisenbahn- und Strassentunnels) des Faltenjuras durchgeführt, wo Opalinuston über eine Strecke von insgesamt 6600 m erschlossen ist (Gautschi 1994 und 2001). Im gesamten Bereich des Opalinustons wurden einzig zwei Feuchtstellen und drei messbare Wasserzutritte beobachtet, die alle in Tunnelabschnitten mit geringer Überdeckung (< 200 m) lagen und im Zusammenhang mit geklüfteten Kalksandsteinlagen oder Störungszonen standen. Beobachtungen dieser Art sind nach Ansicht der HSK wertvoll, aber insofern zu relativieren, als sie nur Rückschlüsse auf um Grössenordnungen höhere Durchlässigkeiten ($K > 10^{-10}$ m/s) erlauben. Eine Erhöhung der Durchlässigkeiten von Klüften oder Störzonen um 2 - 3 Grössenordnungen gegenüber der Gesteinsmatrix ($K = 10^{-13}$ m/s) ist somit aus visuellen Beobachtungen allein nicht erkennbar. Die Nagra ist sich dessen bewusst und begegnet dieser Ungewissheit in der

Sicherheitsanalyse mit Rechenfällen („what-if case“ in NTB 02-05), welche die Konsequenzen von allenfalls auftretenden hydraulisch wirksamen Störungen untersucht.

Durchlässigkeitsverhältnisse in den Rahmengesteinen

Die Malm-Dogger-Mergel-Einheit stellt eine Wechsellagerung toniger, mergeliger und sandigkalkiger Schichtglieder dar, welche in der Bohrung Benken insgesamt tonreich ausgebildet ist und dadurch eine geringe Durchlässigkeit ($K = 2 \cdot 10^{-13}$ m/s) zeigt. Für das erweiterte Gebiet um Benken leitet die Nagra für diese Einheit eine mittlere Durchlässigkeit von $K = 10^{-12}$ m/s ab. Nach Ansicht der HSK ist dies ein vertretbarer Schätzwert.

Der Wedelsandstein zeigt in der Bohrung Benken bei einer Durchlässigkeit von $K = 10^{-12}$ m/s eine überraschend niedrige hydraulische Druckhöhe (342 m ü.M.), die sich deutlich von den benachbarten Formationen abgrenzt. Aufgrund von hydrodynamischen Modellsimulationen, die zur Erklärung der niedrigen hydraulischen Druckhöhe durchgeführt wurden, schliesst die Nagra nicht aus, dass der Wedelsandstein lokal auch höher durchlässig sein könnte. Die Nagra ordnet deshalb dem Wedelsandstein eine 100-fach grössere Durchlässigkeit zu (10^{-10} m/s). Aus heutiger Sicht kann wegen der geringen Datengrundlagen dieser Wert weder bestätigt noch widerlegt werden. In der Nordschweiz liegen bisher aus keiner Bohrung Hinweise auf eine Wasserführung des Wedelsandsteines vor. Der von der Nagra angenommene Wert ist konservativ.

Der tonige Lias zeichnet sich in der Bohrung Benken durch eine sehr geringe Durchlässigkeit aus, die vergleichbar ist zu den Verhältnissen im Opalinuston (anisotrope K-Verteilung). Der Arietenkalk (3.6 m mächtig) erwies sich in der Bohrung Benken als sehr geringdurchlässig ($K = 3 \cdot 10^{-14}$ m/s). Da der Arietenkalk in der Bohrung Siblingen eine Kluft-Wasserwegsamkeit aufwies, hat die Nagra diese Formation als separate hydrogeologische Einheit mit einem mittleren K-Wert von 10^{-10} m/s ausgeschieden. Der Arietenkalk liegt in Siblingen sehr oberflächennah (in 40 m Tiefe), wo Entlastungsklüfte und Verwitterungsvorgänge wirksam werden. Mit hydrodynamischen Modellsimulationen untersuchte die Nagra den Einfluss höherer K-Werte (Faktor 100) und damit die Bedeutung des Arietenkalks als möglichen geringmächtigen Aquifer. Im Zürcher Weinland ändern sich dadurch die Grundwasserflussverhältnisse in den unteren Rahmengesteinen, wo der mächtigere Sandsteinkeuper als lokaler Aquifer dominiert, nur unwesentlich.

Die Lias-Keuper-Tonsteine sind in der Bohrung Benken tonig-mergelig ausgebildet und zeigen eine sehr geringe Durchlässigkeit von $K = 3 \cdot 10^{-14}$ m/s. Für das erweiterte Gebiet des Zürcher Weinlands geht die Nagra von K-Werten von 10^{-12} bis 10^{-11} m/s aus, um möglichen Fazieswechseln Rechnung zu tragen. Nach Ansicht der HSK ist dies ein plausibler Wert und mit den bisherigen Feldmessungen im Einklang.

Der Sandsteinkeuper fasst die Schichtfolge des mittleren Keupers zusammen, in welchem verschiedene wasserführende Formationen auftreten (Stubensandstein, Gansinger Dolomit, Schilfsandstein). In Benken ist der Stubensandstein unerwartet mächtig ausgebildet (11.5 m) und gut durchlässig ($K = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s). Die Wasserführung ist hauptsächlich in einer porösen Dolomitbrekzie zu beobachten. In der Bohrung Weiach wies der Stubensandstein nur eine Mächtigkeit von 0.5 m auf und zeigte keine erhöhte Durchlässigkeit ($K = 1 \cdot 10^{-10}$ m/s). Die Nagra schliesst daraus auf eine heterogene Aquiferstruktur von noch ungeklärter räumlicher Ausdehnung und ordnet dem Sandsteinkeuper eine mittlere Durchlässigkeit von $5 \cdot 10^{-9}$ m/s zu. Der Einfluss höherer Durchlässigkeiten wurde im Rahmen hydrodynamischer Modellie-

rungen untersucht. Die HSK beurteilt dieses Vorgehen als vertretbar und den begrenzten Datengrundlagen angemessen, aus Konservativitätsgründen empfiehlt sie aber, im Referenzfall vom höheren K-Wert, wie er in der Bohrung Benken gemessen wurde, auszugehen.

Regionale Aquifere

Die Malmkalke und der Obere Muschelkalk stellen für ein geologisches Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlands die wichtigsten regionalen Aquifere dar. Die Malmkalke umfassen die zum Teil verkarstungsfähigen Kalkschichten des Portlandians, Kimmeridgians und Oberen Oxfordians. Im Zürcher Weinland bestehen diese Schichten vorwiegend aus mikritischen Kalken mit wenigen Mergellagen. In der Bohrung Benken erwies sich die Durchlässigkeit des Malm-Aquifers als eher gering (mittlerer K-Wert von $1.1 \cdot 10^{-8}$ m/s). Da die Wasserwegsamkeit u.a. an Trennflächen (Klüfte) oder Karsterscheinungen gebunden ist, rechnet die Nagra auch mit einer stärkeren Wasserführung und setzte die Durchlässigkeit auf $5 \cdot 10^{-7}$ m/s fest. Dieser Wert ist nach Ansicht der HSK plausibel und liegt im Grössenbereich der Durchlässigkeiten, wie sie in anderen Bohrungen der Region beobachtet wurden (Weiach, Berlingen).

Die klüftigen Dolomite, insbesondere der Trigonodusdolomit, und die Kalke des Oberen Muschelkalkes bilden das wichtigste Grundwasserstockwerk im Untersuchungsgebiet. Der von der Nagra abgeleitete K-Wert von 10^{-6} m/s für die mittlere Durchlässigkeit des Muschelkalk-Aquifers widerspiegelt gut die bisher vorliegenden Feldmessungen in der Nordschweiz.

2.4.2 Potenzialverteilung und Fliessverhältnisse in den Aquiferen

Angaben der Nagra

Um die Strömungsverhältnisse in den verschiedenen Aquifersystemen abschätzen zu können, hat die Nagra die Potenzialverteilungen in Form von Isolinkarten für die Tiefengrundwässer der Malmkalke, des Sandsteinkeupers und des Muschelkalkes für das Untersuchungsgebiet zusammengestellt. Für die beiden wichtigsten regionalen Aquifere Malm und Muschelkalk liegen relativ viele Potenzialmessungen vor, während für die übrigen hydrogeologischen Einheiten die Datenbasis gering ist. Basierend auf diesen Befunden sowie den Ergebnissen der hydrodynamischen Modellsimulationen diskutiert die Nagra die möglichen Fliessrichtungen in den verschiedenen Grundwasserstockwerken. Danach exfiltriert das Malmwasser in Richtung zum Rhein (Rheinfall-Becken bei Neuhausen und Kaiserstuhl-Weiach), während sich für den Muschelkalk-Aquifer im Untersuchungsgebiet eine Potenzialschwelle abzeichnet und die Exfiltration entweder nach Westen in den Rhein (Koblenz) oder nach Nordosten in Richtung zum Neckar erfolgt. Der Gipskeuper stellt eine wirksame hydraulische Barriere dar, so dass der Muschelkalk gegenüber dem Sandsteinkeuper als potenzieller Freisetzungspfad zurücktritt. Für den Sandsteinkeuper wird eine ähnliche Potenzialschwelle wie im Muschelkalk vermutet, die die Fliessrichtung des Grundwassers bestimmt.

Um das hydrogeologische Konzept überprüfen zu können, hat die Nagra ein regionales und lokales hydrodynamisches Modell erstellt (Kuhlmann et al. 2002). Das Lokalmodell umfasst ein Gebiet von 100 km^2 um die Bohrung Benken, während zum Verständnis der grossräumigen Strömungsverhältnisse und zur Festlegung der Randbedingungen vorgängig auch die angrenzenden Gebiete (Lägern bis Bodensee) im Rahmen eines Regionalmodells in die Betrachtungen miteinbezogen wurden (NTB 90-14).

In der Bohrung Benken zeichnet sich der Wedelsandstein durch eine geringe Durchlässigkeit und eine auffällig niedrige Druckhöhe aus (342 m ü.M.). Im Hangenden wie im Liegenden des Wedelsandsteins werden überhydrostatische Drucke beobachtet. Die Nagra hat zur Klärung dieser Druckverhältnisse verschiedene Hypothesen im Rahmen der hydrodynamischen Modellierungen geprüft (Wedelsandstein als Exfiltrationspfad und Wedelsandstein als Unterdruckzone). Eine durch den Gletscherrückzug verursachte Unterdruckzone, analog wie sie am Wellenberg beobachtet wurde, kann aufgrund der vorliegenden Befunde nicht begründet werden. Die Druckverhältnisse können andererseits im Modell nur dann annähernd reproduziert werden, wenn die Durchlässigkeiten im Wedelsandstein um Grössenordnungen höher angenommen werden. Die Nagra geht deshalb davon aus, dass der Wedelsandstein möglicherweise eine lateral beschränkte Grundwasserführung aufweisen könnte. Eine Exfiltration in einen tiefer gelegenen Vorfluter (Rhein bei Zurzach) würde die niedrigen Drücke erklären.

Beurteilung der HSK

Der Malm-Aquifer weist im süddeutschen Raum von Messkirch über Pfullendorf nach Ravensburg eine NW-SE streichende Grundwasserscheide auf, die etwa parallel zum Bodensee streicht und die Gebiete trennt, die einerseits Richtung Donau und andererseits Richtung Rhein entwässern. Im Zürcher Weinland ist der Malm-Aquifer hydraulisch auf den Rhein ausgerichtet. Die Isolinienkarte der Potenzialverteilung zeigt dabei im Bereich des Rheinflusses bei Schaffhausen eine markante Potenzialsenke. Das steile Potenzialgefälle von Neuhausen bis Benken erklärt die Nagra mit dem Ausbiss der Malmkalke im Rheinfluss-Becken und der relativ geringen Durchlässigkeit des Malms in Benken. Weiter im Süden ist der Gradient im Malm flacher und die Entwässerung erfolgt in Richtung Rhein bei Kaiserstuhl, dem tiefsten Vorfluterniveau der Malmkalke in der Nordschweiz. Die HSK beurteilt diese Ausführungen der Nagra als nachvollziehbar und plausibel.

Die Potenzialverteilung im Muschelkalk-Aquifer zeigt zwischen den Bohrungen Weiach und Herdern eine Potenzialschwelle, die als Grundwasserscheide für die Exfiltration in Richtung Aare-Rhein oder in Richtung Bodensee-Neckar wirkt. Potenzialmessungen aus Erdöl- und Erdgasbohrungen aus dem Süddeutschen Raum (Stober und Villinger 1997) zeigen eine lang gestreckte Potenzialdepression, die sich von Konstanz-Überlingen über das Gebiet Saulgau-Bad Buchau nach Norden erstreckt und die Entwässerung in Richtung zum Neckar definiert. Im Zürcher Weinland dürfte die Entwässerung der Muschelkalkwässer hauptsächlich in Richtung zum Rhein (Waldshut-Koblentz) erfolgen, wenn auch eine partielle Exfiltration in Richtung zum Neckar nicht ganz auszuschliessen ist. Nach Ansicht der HSK weisen die Druckhöhenbestimmungen in den übrigen Nagra-Bohrungen Weiach, Böttstein, Leuggern und Zurzach klar auf eine hydraulische Ausrichtung des Muschelkalkes zum Rhein hin.

Für die Potenzialverteilung in den als Sandsteinkeuper zusammengefassten Formationen Stubensandstein bis Schilfsandstein liegen aus dem Untersuchungsgebiet nur wenige Daten vor. Es ist deshalb schwierig, sich ein verlässliches Bild über die möglichen Fliessrichtungen dieses Aquifers zu machen. Für den Referenzfall nimmt die Nagra für den Stubensandstein eine Exfiltration aus dem Zürcher Weinland in Richtung Klettgau-Rhein an. Dies dürfte nach Ansicht der HSK eine vernünftige und konservative Annahme sein.

Die Fliessverhältnisse im Wedelsandstein sind nach Ansicht der HSK wegen der geringen Datenbasis noch ungeklärt. Bis heute fehlen klare Evidenzen, um die hydraulische Rolle des Wedelsandsteins und die Fliessverhältnisse im weiteren Untersuchungsgebiet belastbar

aufzeigen zu können. Die Daten der Bohrung Benken weisen darauf hin, dass im Wedelsandstein stagnierende saline Wässer vorliegen, die sich in die Diffusionsprofile der natürlichen Tracer (Chlorid, stabile Wasserisotopen, Edelgase) einordnen lassen. Inwieweit diese Ergebnisse lokale Verhältnisse widerspiegeln, lässt sich heute nicht beurteilen. Es können somit noch keine abschliessenden Schlüsse über die regionalen Fliessverhältnisse im Wedelsandstein gezogen werden.

Zum besseren Verständnis der Grundwasserzirkulationsverhältnisse im Untersuchungsgebiet sowie für Sensitivitätsbetrachtungen hat die Nagra numerische Modellierungen durchgeführt (Kuhlmann et al. 2002). Die vorgelegten hydrodynamischen Simulationen entsprechen dem heutigen Stand der Modellierungstechnik. Die Abgrenzung des Modellgebietes und die Festlegung der hydrogeologischen Einheiten werden nach Ansicht der HSK der Problemstellung gerecht und sind vernünftig gewählt. Die Interpretation der Resultate erfolgte vorsichtig und ist dem heutigen Informationsstand angepasst. Als wichtigste Resultate der hydrodynamischen Modellierung konnte der Einfluss einzelner hydrogeologischer Elemente (Wedelsandstein, Arietenkalk, Sandsteinkeuper) und die Barrierenwirkung des Opalinustons aufgezeigt und quantifiziert werden.

2.4.3 Hydrochemie und Verweilzeiten der Tiefengrundwässer

Angaben der Nagra

Zur hydrochemischen und isotopengeochemischen Charakterisierung der Tiefengrundwässer hat die Nagra umfangreiche Untersuchungen an Grundwasser- und Porenwasserproben der Bohrung Benken durchgeführt (NTB 00-01, NTB 02-03). Für die Diskussion und Interpretation der Daten berücksichtigt die Nagra auch zusätzliche Literaturdaten und regionale hydrogeologische Datensätze, die im Rahmen langjähriger Untersuchungsprogramme in der Nordschweiz erhoben wurden (NTB 84-21, NTB 88-07, NTB 91-30). Der Geosynthesebericht NTB 02-03 fasst die hydrochemischen Datengrundlagen zusammen und leitet die für das Zürcher Weinland relevanten hydrogeologischen Schlussfolgerungen ab.

Tiefengrundwässer der Aquifere

Der Datensatz für das Zürcher Weinland diskutiert die Grundwässer des Quartärs und des Tertiärs nur summarisch und geht dann detailliert auf die Typisierung der Grundwässer der tieferliegenden Aquifere ein (Tab. 2.4-2). Die Tiefengrundwässer des Malms, Keupers, Muschelkalkes und Buntsandsteins unterscheiden sich dabei chemisch und isotopengeochemisch deutlich voneinander und weisen auf einen ausgeprägten Stockwerkbau der verschiedenen Grundwasserkörper hin. Anhand der Analyse der chemischen, isotopengeochemischen und hydraulischen Datensätze diskutiert die Nagra die Fliessverhältnisse und Verweilzeiten der Tiefengrundwässer. Die Daten weisen auf eine eigenständige und voneinander getrennte Entwicklungsgeschichte der einzelnen Aquifere hin.

Das Tiefengrundwasser der Malmkalke entspricht chemisch einem Na-Cl-Wasser und zeigt eine geochemische Affinität zu den Tertiärwässern des schweizerischen Molassebeckens. Die hohe Mineralisierung von TDS = 10.2 g/l, die Isotopenzusammensetzung und der hohe He-Gehalt weisen auf ein sehr altes, durch Wasser/Gestein-Wechselwirkung verändertes fossiles Formationswasser marinen Ursprungs hin. Da der Malm-Aquifer mit dem darüberliegenden Tertiär zum Teil ein gekoppeltes hydraulisches System darstellt, werden im Wasser des Malms auch Anteile von Na-Cl-Wässern aus dem Tertiär vermutet. Die Nagra geht auf

diesen Aspekt im Rahmen der hydrodynamischen Fließbetrachtungen ein. Für das Malmwasser schätzt die Nagra Verweilzeiten im Bereich von Hunderttausenden bis Millionen von Jahren ab.

Das Na-SO₄-(Cl)-Wasser im Sandsteinkeuper ist mit einem TDS-Wert von 10.1 g/l ebenfalls hoch mineralisiert. Im Gegensatz zum Malmwasser weisen die $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Daten aber auf einen meteorischen Ursprung der Keuperwässer hin. Aufgrund des Chemismus und der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Isotopensignaturen dürfte sich das Keuperwasser im Wesentlichen in den Lithologien des Keupers selbst entwickelt haben. Anhand der Helium-Daten und der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte wird eine Infiltration während eines Interglazials im Pleistozän abgeleitet, woraus die Nagra auf Verweilzeiten von minimal $2.5 \cdot 10^4$ bis maximal $2.6 \cdot 10^6$ Jahren schliesst.

Die Tiefengrundwässer des Muschelkalkes und des Buntsandsteins sind bedeutend geringer mineralisiert und aufgrund der gemessenen ^{14}C -Gehalte wesentlich jünger. Anhand der Isotopensignatur wird für das Muschelkalkwasser eine Verweilzeit im Untergrund von ca. $1.4 \cdot 10^4$ Jahren und für das Buntsandsteinwasser von über $2.5 \cdot 10^4$ Jahren abgeschätzt.

Tabelle 2.4-2: Chemismus und Isotopensignaturen der Tiefengrundwässer der Bohrung Benken (aus NTB 00-01 und NTB 02-03).

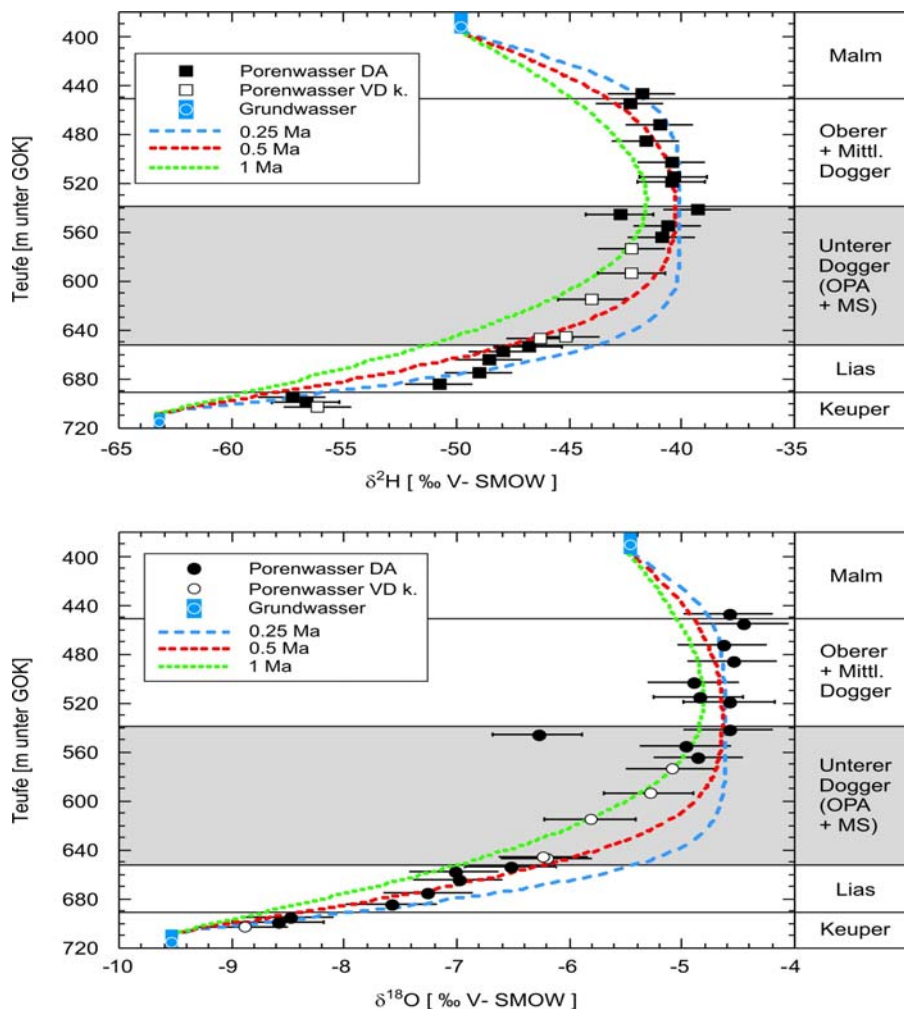
TDS = Total Disolved Solids

Aquifer	Wassertyp	TDS g/l	He cm ³ /g	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Tiefengrund- wasser	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Gestein (G) Aderkalzit (cc)
Malm	Na-Cl-(SO ₄)	10.2	$3.2 \cdot 10^{-4}$	-53.4	-6.32	0.707 518	0.707 043 _G 0.707 496 _{CC}
Keuper	Na-SO ₄ -(Cl)	10.1	$2.1 \cdot 10^{-4}$	-63.2	-9.53	0.708 817	0.708 788 _G 0.709 252 _{CC}
Muschelkalk	Ca-Mg-SO ₄ -(HCO ₃)	2.6	$5.6 \cdot 10^{-7}$	-88.1	-12.3	0.708 304	0.708 444 _G 0.708 390 _{CC}
Buntsandstein	Na-HCO ₃ -Cl-(SO ₄)	1.4	$1.5 \cdot 10^{-4}$	-77.6	-11.04	0.714 847	--

Porenwässer der geringdurchlässigen Formationen

Aus den geringdurchlässigen Gesteinsformationen (Opalinuston und Rahmengesteinen) konnten in der Bohrung Benken mit konventionellen Methoden keine Wasserproben gewonnen werden. Die Charakterisierung erfolgte deshalb in diesen Gesteinen ausschliesslich an extrahierten Porenwasserproben, welche aus Bohrkernen mittels verschiedener Verfahren wie der Squeezing-Methode, der Vakuum-Destillations-Methode und der Diffusions-Austausch-Methode gewonnen wurden. Wie anhand der Isotopensignaturen $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ sowie der Chlorid-Gehalte gezeigt wird, haben sich für diese Stoffe in den Porenwässern vom Malm bis zum Keuper typische Verteilungen entwickelt, die gemäss der Nagra nur

durch Diffusion als dominierender Transportprozess beschrieben werden können (Fig. 2.4-2 und 2.4-3).

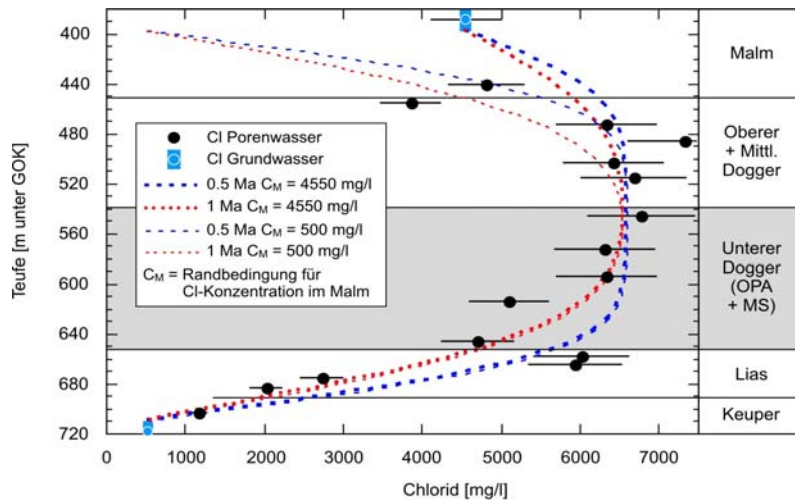


Figur 2.4-2: Variation der in den Porenwässern der Bohrung Benken bestimmten $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenzusammensetzungen in Funktion zur Tiefe der Probe, verglichen mit den für verschiedene Zeiträume berechneten Diffusionsprofilen (aus NTB 02-03).

GOK = Geländeoberkante
 SMOW = Standard Mean Ocean Water
 DA = Diffusions-Austauschmethode
 VD_k = Korrigierte Werte der Vakuum-Destillations-Methode

Unter Verwendung von experimentell im Labor bestimmten Diffusionskonstanten leitet die Nagra anhand analytischer Lösungen des diffusiven Stofftransportes für den Aufbau dieser Wasserstoffisotopen- und Chlorid-Konzentrationsprofile Zeiträume von mehreren Hunderttausenden bis eine Million Jahre ab. Die Diffusionsprofile weisen in den Tiefenbereichen, wo aufgrund hydraulischer (niedrige Druckspiegelhöhe im Wedelsandstein) oder strukturgeologischer Befunde (Störungszone) eine Beeinflussung zu erwarten wäre, keinerlei Anomalien auf. Die Nagra schliesst daraus, dass in diesen Zonen über sehr lange Zeiträume (bis 1 Million Jahre) keine signifikanten, advektiven Fluidbewegungen stattgefunden haben. Das Porenwasser im Opalinuston ist vom Chemismus her ein Na-Cl-Wasser von ursprünglich mariner Zusammensetzung, wobei der Chloridgehalt aufgrund des diffusiven Austau-

sches mit den begrenzenden Aquiferen abgereichert wurde. Die Form der Profile und die Modellrechnungen schliessen im Vergleich zur Diffusion einen namhaften vertikalen advektiven Fluss aus.



Figur 2.4-3: Variation der Chloridgehalte in den Porenwässern der Bohrung Benken in Funktion zur Tiefe der untersuchten Gesteinsproben, verglichen mit den für verschiedene Zeiträume berechneten Diffusionsprofilen. Bei der Modellierung wurden zwei unterschiedliche Chlorid-Konzentrationen im Malm (C_M) als Randbedingung untersucht (aus NTB 02-03).

GOK = Geländeoberkante

Für die Herleitung des Opalinuston-Referenzwassers für die Sicherheitsanalyse stützt sich die Nagra auf Befunde der Porenwasseranalysen an Bohrkernproben der Bohrung Benken, Messungen aus dem Felslabor Mont Terri sowie auf geochemische Modellrechnungen (Pearson 2002). Das Porenwasser weist eine Ionenstärke von 0.23 mol/l und einen nominalen Chloridgehalt von 0.16 mol/kg_{H₂O} auf. Die Zusammensetzung des Porenwassers wird durch das Gestein über die Wechselwirkung mit den Karbonatmineralien, durch Kationenaustausch an den Tonmineralien sowie durch Pyrit gepuffert. Der beste Schätzwert für die pH- und Redox-Bedingungen liegt bei pH = 7.2 und Eh = -167 mV. Aufgrund der noch vorhandenen Ungewissheiten insbesondere bezüglich pH, pCO₂ und Redoxpotential gibt die Nagra in der Sicherheitsanalyse Bandbreiten der einzelnen Parameterwerte an.

Beurteilung der HSK

Experimentelle Aspekte

Aus den tiefliegenden Aquiferen konnten in der Bohrung Benken sechs Wasserproben unter teils schwierigen experimentellen Bedingungen gewonnen werden. Während die Beprobungen des Sandsteinkeupers, des Muschelkalks und des Buntsandsteins Wasserproben von sehr guter Qualität lieferten (Kontamination durch Bohrspülung < 1 %), war die Entnahme einer guten Malmwasserprobe weit schwieriger. Wegen seiner klüftigen und karstigen Ausbildung traten in diesem Aquifer während des Bohrvorganges Spülungsverluste auf, die zu einer Kontamination der Wasserproben führte (Kontamination 17–21 %). In den Nagra-

Berichten zur Sondierbohrung werden diese Schwierigkeiten ausführlich dargelegt und bei der Interpretation der Daten berücksichtigt.

Die experimentellen Aspekte der Messungen der Wasserisotope in den Porenwässern sind in den in NTB 02-03 referenzierten technischen Hintergrundsberichten dargelegt. Mit der Diffusions-Austausch-Methode (DA) zur Bestimmung der stabilen Isotopenzusammensetzung von Wasser ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) wurde experimentelles Neuland betreten. Im Vergleich zur standardmässig angewandten Vakuum-Destillations-Methode (VD) liefert die neue Methode deutlich höhere Gehalte an schwereren Isotopen. Die Abweichungen kommen - wie in den Berichten ausgeführt - dadurch zustande, dass die VD-Methode nicht alles Wasser aus der Gesteinprobe zu extrahieren vermag. Dadurch sind die so bestimmten Isotopenzusammensetzungen prinzipiell als fraktioniert anzusehen, da die schweren Isotope tendenziell im Gestein verbleiben und die leichten im extrahierten Wasser angereichert sind. Diese experimentelle Einschränkung entfällt bei der DA-Methode, so dass diese Technik - im Einklang mit den von der Nagra gezogenen Schlüssen - als die robustere und verlässlichere Methode anzusehen ist. Wegen technischen und experimentellen Problemen lieferte die DA-Methode für den zentralen Bereich des Opalinustons im Tiefenabschnitt von 570 m bis 650 m keine verwertbaren $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte. In diesem Tiefenbereich liegen somit nur fraktionierte VD-Messwerte vor. Aus dem Vergleich der beiden Methoden hat die Nagra eine Korrektur für die Fraktionierung abgeleitet und die Messwerte im Tiefenbereich von 570 m bis 650 m entsprechend korrigiert (VD_K -Werte). Die HSK beurteilt dieses Vorgehen als angebracht.

Cl-Isotopenmessungen sind im Vergleich zu den Messungen der stabilen Wasserisotope analytisch noch anspruchsvoller und unterliegen entsprechend noch stärker experimentellen Einschränkungen. In feinkörnigen Gesteinen wie dem Opalinuston kann nicht immer davon ausgegangen werden, dass alles extrahierte Cl^- im Gestein effektiv als im Porenwasser gelöste Spezies vorlag. Die Nagra diskutiert verschiedene Prozesse, welche diese grundlegende Annahme einschränken könnten (elektrostatische Ionenrestriktion, ionenselektive Porosität, etc). Keine der angesprochenen Vorgänge vermag aber die Cl-Isotopenzusammensetzung massgebend zu beeinflussen und zu fraktionieren. Die von der Nagra getroffenen Annahmen sind nach Ansicht der HSK vernünftig und die Schlussfolgerungen der Auswertung vorsichtig abgeleitet.

Chemismus der Tiefengrundwässer

In der Bohrung Benken grenzen sich die Tiefengrundwässer geochemisch und isotopengeochemisch deutlich von den oberflächennahen Grundwässern der quartären Lockergesteine ab. Die Grundwässer des Quartärs zeichnen sich durch eine geringe Mineralisierung, einen typischen Chemismus (Ca-Mg-HCO_3 -Wässer) und durch hohe Gehalte an atmosphärischem ^{14}C und Tritium aus. Aufgrund der Tritium-Werte handelt es sich um rezent infiltrierte Wässer mit nur kurzen Verweilzeiten im Untergrund (< 30 Jahre).

Die Tiefengrundwässer des Malms, Keupers, Muschelkalkes und Buntsandsteines sind alle Tritium-frei und weisen keine Anzeichen einer Beimischung von rezentem Wasser auf. Die Tiefengrundwässer weisen unterschiedliche Mineralisierungen auf und unterscheiden sich damit deutlich. Die das Wirtgestein begrenzenden Grundwässer des Malms (oben) und des Keupers (unten) fallen durch hohe, mit den Porenwässern der Tone und Mergel vergleichbare Gehalte an gelösten Stoffen von über 10 g/l (TDS) auf.

Während die Wasserisotopenverhältnisse des Keuper-, Muschelkalk- und Buntsandsteinwassers auf die globale meteorische Wasserlinie (GMWL) fallen, weicht das Tiefengrundwasser des Malm-Aquifers klar davon ab. Die $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Malmwassers lassen zusammen mit den chemischen Kennwerten auf ein Mischwasser schliessen, welches durch Gesteins-Wasser-Wechselwirkung überprägt ist und noch Anteile von altem marinem Formationswasser enthält. Die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Isotopensignaturen weisen darauf hin, dass eine Beimischung von tertiärem Meerwasser aus den überliegenden Molassegesteinen stattgefunden hat. Es wird wohl richtigerweise davon ausgegangen, dass das Malmwasser in Benken sehr hohe Verweilzeiten hat und faktisch zu stagnieren scheint.

Demgegenüber haben sich die Tiefengrundwässer im Muschelkalk und Buntsandstein als ursprüngliche meteorische Wässer in den entsprechenden Aquifergesteinen entwickelt. Die Isotopenmessungen (^{14}C , He, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$) zeigen, dass die Wasseraufenthaltszeiten in den Aquifern des Muschelkalks und des Buntsandsteins deutlich kleiner sind als die in den Malm- und Keuperaquifern. Das Muschelkalkwasser wurde wohl gegen Ende des letzten Glazials (^{14}C -haltig, Modellalter 12'000 – 14'000 Jahre) gebildet. Das Buntsandsteinwasser scheint ebenfalls glazial, aber etwas älter zu sein (praktisch kein ^{14}C). Die Nagra schätzt für dieses Wasser eine Verweilzeit von $> 2.5 \cdot 10^4$ Jahren ab, was nach Ansicht der HSK plausibel erscheint.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die von der Nagra dargelegte Interpretation der chemischen und isotopengeochemischen Daten der Aquifere nachvollziehbar, logisch und in sich konsistent ist. Die Daten zeigen, dass sich die Tiefengrundwässer chemisch unabhängig voneinander entwickelt haben. Wegen ihrer grösseren räumlichen Distanz zum Opalinuston und den dazwischen liegenden hydraulischen Barrieren dürften die Aquifere des Muschelkalkes und des Buntsandsteins die Austauschprozesse im Wirtgestein kaum beeinflussen. Für den Sicherheitsnachweis ist wesentlich, dass die Tiefengrundwässer grosse Verweilzeiten aufweisen, voneinander hydraulisch entkoppelt sind und sich, mit Ausnahme des Malmwassers (enthält Anteile von Tertiärwasser), geochemisch innerhalb der jeweiligen Aquifergesteine entwickelt haben.

Isotopenuntersuchungen an Porenwässern

$\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen: Die in der Bohrung Benken an Porenwässern des Opalinustons und der Rahmengesteine gemessenen Isotopenwerte für Wasserstoff und Sauerstoff ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) lassen einen charakteristischen Profilverlauf erkennen (Fig. 2.4-2). Die im zentralen Bereich gefundenen schwereren Isotopenwerte werden als Reste eines ursprünglich marinen Formationswassers interpretiert. Gegen die begrenzenden Aquifere hin nähert sich die Isotopie kontinuierlich der isotopischen Zusammensetzung der Tiefengrundwässer des Malms und des Keupersandsteins an, d. h. mit zunehmender Entfernung vom zentralen Bereich des Wirtgesteins werden die Porenwässer zusehends isotopisch leichter. Es bilden sich so räumlich gekrümmte Isotopenprofile aus. Gemäss Nagra lassen sich die beobachteten Isotopenprofile nur verstehen, wenn der Transport über den gesamten Raumbereich des Opalinustons und der Rahmengesteine weitgehend diffusiv erfolgt. Gimmi und Waber (2003) haben diese wesentliche Annahme der Interpretation der gemessenen Isotopenzusammensetzung der Porenwässern zu Grunde gelegt. Die Daten wurden ausgehend von analytischen Lösungen, wie sie sich für den eindimensional advektiv-diffusiven Transport für einfache Geometrien ergeben, interpretiert. Es wurde angenommen, dass sich der Gesteinsbereich als homogene Platte mit konstanten physikalischen Transporteigenschaften beschrei-

ben lässt, der gegen oben und unten durch die Aquifere des Malms und des Keupers begrenzt wird. Diese beiden begrenzenden Grundwässer bilden isotopengeochemische Randbedingungen, die infolge des Stoffgradienten den diffusiven Wasser- und Stofftransport bewirken.

Qualitativ ergeben sich sowohl für die $\delta^2\text{H}$ - als auch für die $\delta^{18}\text{O}$ -Modellierung die beste Übereinstimmung mit den gemessenen Daten, wenn dem einfachsten aller denkbaren Szenarien folgende Annahmen zugrunde gelegt werden:

- a) Rein diffusiver Transport (Advektion vernachlässigbar)
- b) Zeitlich konstante Konzentrationen in den Aquiferen
- c) Anfänglich homogene Isotopie der Porenwässer über den gesamten Bereich des Wirtgesteins.

Die mit diesen Annahmen berechneten Diffusionszeiten liegen im Bereich von $2.5 \cdot 10^5$ - $1 \cdot 10^6$ Jahren. Die Spanne des angegebenen Zeitbereiches erklärt sich aus den experimentellen Ungewissheiten bei der Bestimmung der effektiven Diffusionskoeffizienten. Gimmi und Waber (2003) zeigen, dass die Peclet-Zahl (Verhältnis des advektiven zum diffusiven Transport) deutlich kleiner als 1 sein muss, damit eine hinreichende Übereinstimmung zwischen den Rechenergebnissen und den Messdaten erreicht wird. Werden die von der Nagra ermittelten Werte als repräsentativ für den Transport angesehen, ergibt sich eine Peclet-Zahl von ~ 0.3 und eine Advektionsgeschwindigkeit von $1 \cdot 10^{-13}$ m/s. Daraus folgt, dass Diffusion der kontrollierende Transportprozess ist.

Nach Ansicht der HSK ist die Modellierung und Argumentation der Nagra nachvollziehbar und plausibel. Bevor die Resultate näher kommentiert werden, sind einige Bemerkungen zur Datendichte anzubringen:

- Aus dem Übergangsbereich zwischen den oberen Rahmengesteinen und dem Malm-Aquifer (396 m bis 446 m) liegen keine Porenwasseruntersuchungen vor. Dadurch ist der Übergang zum Malm-Aquifer über eine Strecke von 50 m hin experimentell nicht belegt. Bei künftigen Bohrungen sollte dieser Gesteinsbereich in die Untersuchungen miteinbezogen werden.
- Im Bereich des Opalinustons (573 m bis 647 m) liegen aus experimentell-technischen Gründen nur korrigierte $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenmessungen der VD-Methode vor (VD_K in Fig. 2.4-2). Daten mit der zuverlässigeren DA-Methode fehlen hier. Nach Ansicht der HSK stellt dieser Mangel aber die Interpretation nicht in Frage.

Zusammenfassend können aus der Sicht der HSK folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die untersuchten Porenwässer im Opalinuston lassen sich plausibel als Überbleibsel eines ehemaligen marinen Formationswassers interpretieren.
- Die vorgelegten $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverteilungen zeigen, dass diffusive Transportprozesse gegenüber advektiven den Austausch von Wasser und Wasserinhaltsstoffen kontrollieren. Die beobachtete gekrümmte Form der Profile lässt sich nur erklären, wenn diffusive Prozesse auch über grosse Strecken dominieren.
- Um die $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Profile zu entwickeln, müssen Stoffe während mehreren Hunderttausenden bis Millionen von Jahren zwischen Aquitarden und den begrenzenden Aquiferen ausgetauscht haben. Im Vergleich zur Selbstdiffusion von Wasser-

molekülen in Wasser diffundieren die meisten Stoffe langsamer, da diese durch Wechselwirkung mit der Gesteinsmatrix zusätzlich retardiert werden.

Die Nagra hat wegen der inhärenten Unkenntnis der isotopengeochemischen Anfangs- und Randbedingungen darauf verzichtet, eine vertiefte Sensitivitätsanalyse der gefundenen Resultate vorzunehmen. Die HSK empfiehlt, eine solche Analyse durchzuführen, falls der Datensatz erneut untersucht wird.

Cl-Messungen: Die Untersuchungen der Chloridkonzentrationen in den Porenwässern des Opalinustons und der Rahmengesteine decken sich qualitativ gut mit den $\delta^2\text{H}$ - und den $\delta^{18}\text{O}$ -Resultaten. Die gefundenen Konzentrationsverteilungen lassen sich verstehen, wenn wiederum angenommen wird, dass der Stoffaustausch zwischen Opalinuston und den begrenzenden Aquiferen hauptsächlich diffusiv erfolgt. Die gemessenen Cl-Konzentrationen der Porenwässer zeigen, dass das Wirtgestein noch einen beachtlichen Anteil an marinem Formationswasser enthält, welches heute langsam als Folge des diffusiven Transportes in Richtung der Aquifere entweicht. Das Chlorid aus den Porenwässern entweicht hauptsächlich gegen unten in Richtung des Keupers (Stubensandsteins). Entsprechend sensitiv reagiert die Modellierung auf die Wahl der unteren Randbedingung, d.h. auf die konkrete Wahl, welche isotopengeochemische Entwicklung dem Stubensandstein zugewiesen wird. Das Grundwasser im Malm ist isotopengeochemisch den Porenwässern im Opalinuston ähnlich. Die Nagra wertet dies als Hinweis, dass vor der hydraulischen Aktivierung des Stubensandsteins über einen grösseren räumlichen Bereich ähnliche isotopengeochemische Verhältnisse wie im Opalinuston geherrscht haben müssen. Nach Ansicht der HSK ist dieser Schluss plausibel und nachvollziehbar.

2.4.4 Wasserfluss durch das Endlager

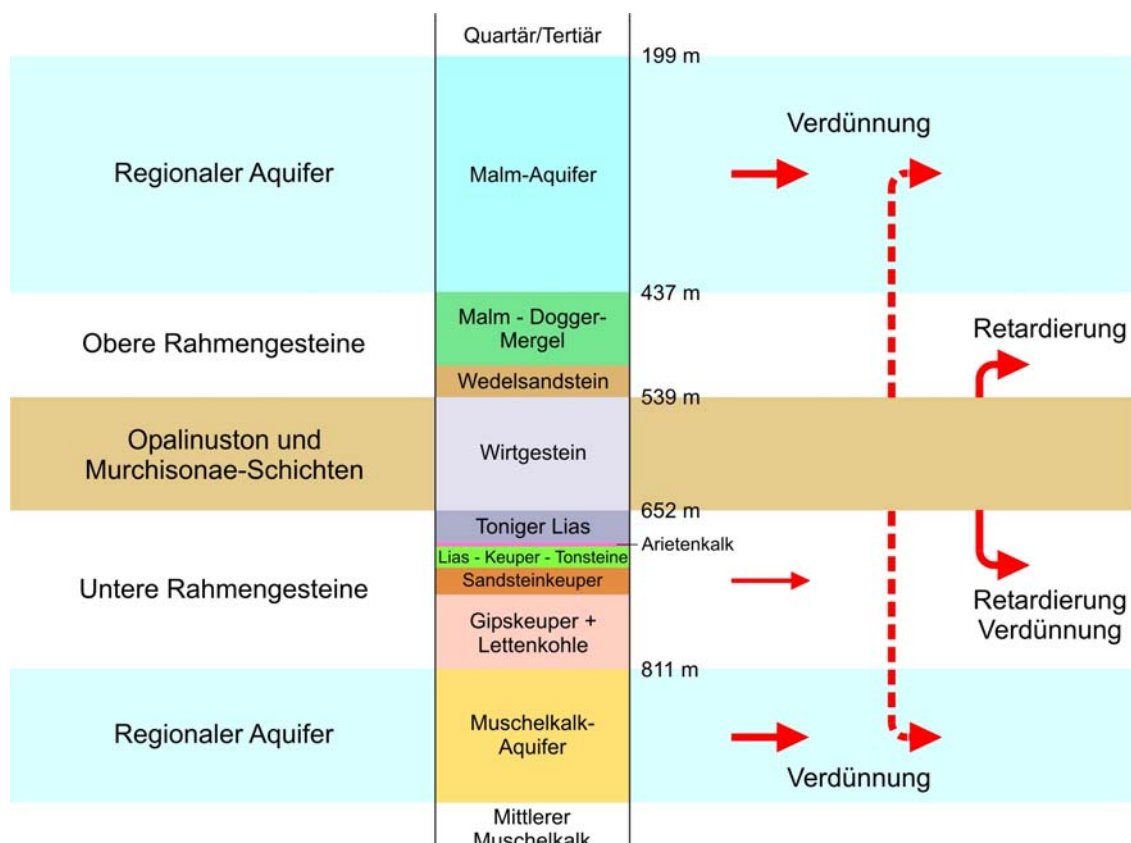
Angaben der Nagra

Um die Grundwasserfliessverhältnisse im Umfeld des Tiefenlagers verstehen und die für die Freisetzungs- und Ausbreitungsrechnungen relevanten Wasserflüsse quantifizieren zu können, führte die Nagra verschiedene hydrodynamische Modellierungen durch (vgl. Fig. 2.4-4). Mit dem hydrodynamischen Lokalmodell wurden die Grundwasserflüsse im Opalinuston und in den Rahmengesteinen quantifiziert und die Bedeutung des Wedelsandsteines und des Sandsteinkeupers als potenzielle Entwässerungspfade untersucht. Um den Einfluss der Untertagebauten und der durch den Bau hervorgerufenen Auflockerungszone im umgebenden Gebirge (Excavation Damaged Zone = EDZ) auf den Wasserfluss beurteilen zu können, erstellte die Nagra ein weiteres hydrodynamisches Modell des Lagerumfeldes, das räumlich in das Lokalmodell eingebettet wurde. Die Zugangsbauwerke und Lagerstollen wurden dabei entsprechend dem Lagerlayout diskretisiert und in das Finite-Elemente-Netz integriert (NTB 02-03). Schliesslich hat die Nagra für die Sicherheitsanalyse mittels eines Resistor-Network-Modells den Wasserfluss entlang einzelner Kompartimente des Lagersystems untersucht und anhand von Sensitivitätsanalysen den Einfluss unterschiedlicher Durchlässigkeiten der Auflockerungszone analysiert.

Die Berechnungen der Nagra zeigen, dass auf Lagerebene die spezifischen Wasserflüsse im Opalinuston extrem klein sind und die Fliesspfade aufgrund der Gradienten praktisch senkrecht nach oben zum Wedelsandstein verlaufen. Für den Referenzfall (Gradient = 1) berechnet die Nagra eine mittlere vertikale Darcy-Geschwindigkeit im Wirtgestein von $2 \cdot 10^{-14}$ m/s.

Berücksichtigt man den Porenwasser-Überdruck im Opalinuston und die damit verbundene Erhöhung des hydraulischen Gradienten auf 5, so erhöht sich die Fließgeschwindigkeit auf $1 \cdot 10^{-13}$ m/s.

Die Nagra hat in einem weiteren Schritt die Wasserflüsse entlang der verfüllten und versiegelten Stollen und der Auflockerungszone untersucht. Im Opalinuston wurde auf Lagerebene um die Bauwerke herum eine zweischalige Auflockerungszone angenommen, deren Ausdehnung vom Ausbruchquerschnitt und von den Spannungsverhältnissen im Gebirge abhängen. Die Mächtigkeit der Auflockerungszonen liegt im Bereich von 0.9 m (BE/HAA-Stollen) bis 4.5 m (LMA-Lagertunnels). Gestützt auf experimentelle Daten aus dem Felslabor Mont Terri und das heutige Verständnis der langzeitlichen Entwicklung geht die Nagra von einer Durchlässigkeit der Auflockerungszone von 10^{-12} m/s aus. Die Modellierungen umfassen einen Referenzfall und 10 Sensitivitätsbetrachtungen. Die Ergebnisse zeigen, dass gegenüber den Modellierungen ohne Präsenz eines Tiefenlagers keine wesentlichen Änderungen in den Wasserflüssen zu beobachten sind. Wegen der sehr geringen Durchlässigkeit des Opalinustons bleibt der Einfluss der Untertagebauwerke auf den Wasserfluss klein. Eine Ausnahme bildet der Fall, wo sich durch Gasproduktion in den Lagerstollen erhöhte Gasdrücke bilden. Diese können zu einer Erhöhung des Wasserflusses um maximal eine Größenordnung führen.



Figur 2.4-4: Überblick über die hydrogeologische Situation des Opalinustons und Konzept möglicher Freisetzungspfade (aus NTB 02-03).

Beurteilung der HSK

Aufgrund der vorgelegten Datengrundlagen und Modellierungsergebnisse zeigt die Nagra in überzeugender Art und Weise, dass wegen der geringen Durchlässigkeit der Stofftransport im Opalinuston primär diffusiv erfolgt und der Wasserfluss im Wirtgestein sehr klein ist. Bei derart geringen Durchlässigkeiten stellen die Untertagebauwerke mit ihrer Auflockerungszone (EDZ) eine Verletzung der Diffusionsbarriere dar, die nach dem Verschluss des Lagers potenzielle Fließpfade hinterlassen können. Die Nagra hat im Rahmen der hydrodynamischen Modellierungen diesen Aspekt speziell untersucht und die Ergebnisse dokumentiert (NTB 02-06).

In der Sicherheitsanalyse hat die Nagra neben dem Referenzfall auch weitere Varianten untersucht (Varianten 1.6a und 1.6b des Referenzfalles), die den advektiven Grundwasserfluss entlang der Untertagebauwerke und der Auflockerungszone analysieren. Für die Sicherheitsbetrachtung ist dies von zentraler Wichtigkeit. Die HSK hat deshalb ihren Experten der Ingenieurgeologie der ETH-Zürich beauftragt, mit eigenen Modellrechnungen die von der Nagra berechneten Werte zu überprüfen. Die Ergebnisse dieser Überprüfung sind im Bericht (Fidelibus und Löw 2004) dokumentiert und werden im Folgenden erläutert und zusammengefasst.

Der Grundwasserdurchfluss durch das Lagersystem nach Verschluss des Tiefenlagers wird bestimmt durch

- die Potentialgradienten zwischen dem Lager und den angrenzenden Aquiferen (Wedelsandstein und Sandsteinkeuper),
- die vertikale Durchlässigkeit des ungestörten Opalinustons,
- die durchflusswirksamen Querschnittsflächen der Untertagebauwerke,
- die Durchlässigkeit der Bentonitbarriere,
- die Durchlässigkeit und Ausdehnung der Auflockerungszone,
- sowie die Durchlässigkeit und Ausdehnung der Versiegelungen.

Bei Grundwasserbewegungen hängt die Advektion normalerweise linear vom hydraulischen Gradienten ab (Darcy-Gesetz). Bei sehr dichten Tongesteinen lassen Forschungsarbeiten vermuten, dass die Strömung des Porenwassers erst ab einem bestimmten Potenzialgradienten (Schwellenwert) eintritt. Die Nagra rechnet in ihren Modellen vorsichtshalber mit keinem Schwellenwert und der uneingeschränkten Gültigkeit des linearen Darcy-Gesetzes. Dadurch wird der Wasserfluss eher überschätzt, was ein konservatives Vorgehen ist.

Parameterwerte

In den meisten Berechnungen zur Sicherheitsanalyse der Nagra werden der heute vermutlich vorhandene Überdruck im Bereich des Opalinustons sowie die Barrierenwirkung der Rahmengesteine nicht berücksichtigt. Demzufolge wird der für die Durchflussberechnungen anzusetzende hydraulische Gradient aus den heute geschätzten hydraulischen Potenzialen des Sandsteinkeupers (465 m) und des Wedelsandsteins (342 m) abgeleitet. Es ergibt sich dadurch ein nach oben gerichteter hydraulischer Gradient von etwa 0.7. Die Nagra geht von einem Wert von 1 aus (NTB 02-06). In der nachfolgend diskutierten Modellierung der ETH

(Fidelibus und Löw 2004) wird am Ausgang des Schachtes und der Rampe ein Potenzial von 342 m angesetzt.

Die Nagra geht bei der Variante 1.6a des Referenzfalles (Radionuklidausbreitung beeinflusst durch Rampe/Schacht) von folgenden Parameterwerten aus (NTB 02-06):

- Vertikale Durchlässigkeit des Wirtgesteins K_v : $2 \cdot 10^{-14}$ m/s
- Hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone K_{EDZ} : $1 \cdot 10^{-12}$ m/s
- Hydraulische Durchlässigkeit des Bentonits K_B : $1 \cdot 10^{-13}$ m/s
- Hydraulische Durchlässigkeit der Versiegelungen K_S : $1 \cdot 10^{-13}$ m/s
- Hydraulische Durchlässigkeit der verfüllten Tunnelstrecken K_{BF} : $5 \cdot 10^{-11}$ m/s
- Verhältnis Radius EDZ/BE-HAA-Stollen γ_{HAA} : 1.61
- Verhältnis Radius EDZ/LMA-Tunnel γ_{LMA} : 1.22
- Verhältnis Radius EDZ/Rampe γ_R : 1.42
- Verhältnis EDZ/Schacht γ_S : 1.50
- Verhältnis Radius EDZ/Bau- und Betriebstunnel γ_A : 1.44

Nach den von der Nagra vorgelegten Ergebnissen ist die vertikale Durchlässigkeit des Wirtgesteins im Referenzfall nachvollziehbar. Die hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone K_{EDZ} zum Zeitpunkt der Radionuklidfreisetzung ist nicht exakt bestimmbar. Der im Referenzfall angenommene Wert von $1 \cdot 10^{-12}$ m/s erscheint plausibel. Ein alternativer Wert (100-fach höher) wird in Variante 1.6b angenommen. Die angenommene hydraulische Durchlässigkeit des aufgesättigten Bentonites K_B steht im Einklang mit Literaturwerten für kompaktierten Bentonit in Blockform und mit dem von Pusch et al. (2002) ermittelten Wert für Bentonit in Granulatform. Die Auflockerungszone um die Versiegelungen wird von der Nagra in den Modellrechnungen zur Sicherheitsanalyse belassen (NTB 02-06), obwohl sie beim Bau der Versiegelungsstrecken zum Teil entfernt werden kann. Die Grössen der Auflockerungszonen liegen in den wahrscheinlichsten Bandbreiten.

Berechnungsergebnisse

Unter der Annahme einer effektiven vertikalen Durchlässigkeit des Opalinustons von $2 \cdot 10^{-14}$ m/s und einem hydraulischen Gradienten von 1 ergeben sich spezifische Wasserflüsse durch das Wirtgestein ohne Lagerbauwerke in gleicher Grössenordnung oder von maximal $1 \cdot 10^{-13}$ m/s (unter Berücksichtigung der Überdruckzone). Unter Berücksichtigung der Lagerbauwerke ergibt sich nach den Berechnungen der Nagra (NTB 02-06, S. 58) im Referenzfall ein volumetrischer Gesamt-Durchfluss durch die Endlagerebene von $0.1 \text{ m}^3/\text{a}$; nach den Berechnungen der ETH liegt dieser Wert bei $0.5 \text{ m}^3/\text{a}$. Der Unterschied ist in den verschiedenen Ansätzen begründet, die zur analytischen Abschätzung der vertikalen Durchströmung verwendet wurden (pessimistischer Ansatz bei der ETH mit grösserer hydraulischer Einzugsfläche eines Lagerstollens im anisotropen Wirtgestein). Die dabei errechneten Peclet-Zahlen bestätigen die Dominanz des diffusiven Stofftransportes. Für den alternativen Wert von $K_v = 1 \cdot 10^{-13}$ m/s erhöhen sich die vertikalen Durchflüsse nahezu proportional um eine Grössenordnung.

Die Modellierungen der ETH zeigen, dass die an sich sehr kleinen Wasserflüsse an einzelnen Stellen des Lagersystems etwas grösser sein können als mit dem Resistor-Netzwerk-Modell von der Nagra berechnet (Tabelle 2.4-3). Dies betrifft insbesondere den Zugangstunnel (Rampe) und den Schacht.

Nach den Berechnungen der Nagra ergeben sich für die Variante 1.6a des Referenzfalles nach oben gerichtete Flüsse von $3.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{a}$ durch den Schacht und von $6.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{a}$ entlang der Rampe. Berechnungen der ETH mit einem vergleichbaren Röhren-Netzwerk-Modell führen bei gleicher Parametrisierung zu etwas höheren Durchflüssen durch Schacht ($5.7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{a}$) und Rampe ($1.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{a}$). Die Differenz ist auf die oben erwähnte grössere hydraulische Einzugsfläche der Lagerbauwerke im ETH-Modell zurückzuführen.

Tabelle 2.4-3: Berechnete Wasserflüsse durch verschiedene Elemente des Lagersystems

Lagerelement	Wasserfluss Q (m^3/a) nach Nagra (NTB 02-06)	Wasserfluss Q (m^3/a) nach ETH (Fidibus und Löw 2004)
Zugangstunnel	$6.5 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$
Bautunnel	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$3.8 \cdot 10^{-4}$
Betriebstunnel	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$5.0 \cdot 10^{-4}$
Schacht	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$5.7 \cdot 10^{-4}$

In NTB 02-06 wird auch der Einfluss einer alternativen Parametrisierung der EDZ analysiert (K_{EDZ} von $1 \cdot 10^{-11}$ bis $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$). Nach NTB 02-06 konvergieren bei einer EDZ-Durchlässigkeit von etwa $1 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ die Wasserflüsse durch das Endlager gegen konstante Werte, die auch beim Schacht und der Rampe $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{a}$ kaum übersteigen. Die Berechnungen der ETH zeigen kein solches Verhalten. Mit zunehmender Durchlässigkeit der EDZ ergeben sich anfänglich nahezu linear zunehmende Wasserflüsse durch den Schacht bis zu einer EDZ-Durchlässigkeit von etwa $1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$. Diese Unterschiede im Modellverhalten sind auf eine für hohe EDZ-Durchlässigkeiten unzulässige Vereinfachung im Resistor-Netzwerk-Modell der Nagra zurückzuführen. In Schneider und Gribi (2004) werden die Ursachen geklärt und die neuen Werte dargelegt, die mit den Resultaten der ETH übereinstimmen. Die neuen Rechnungen der Nagra wie auch die ETH-Modellierungen zeigen, dass erst bei einer EDZ-Durchlässigkeit von rund $1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ die Wasserflüsse zu einem stabilen Wert konvergieren (was für die im NTB 02-05 dokumentierten Rechnungen nicht relevant ist).

Mit dem „What-if-Case“ 4.2 (Transport von Radionukliden entlang transmissiver Diskontinuitäten) hat die Nagra die Auswirkung erhöhter Durchlässigkeiten entlang tektonischer Trennflächen und Störungen untersucht. Der Fall 4.2 mit Transmissivitäten von $1 \cdot 10^{-10}$ und $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ deckt die Ungewissheit in den Transmissivitäten kleiner Störungszonen, die das Lager durchschlagen könnten, ab. Bei einer Transmissivität von $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ und der Annahme, dass die Störungszone sowohl die BE/HAA-Lagerstollen wie auch das ganze LMA-Lager betrifft, resultieren Dosen von $1.1 \cdot 10^{-2} \text{ mSv/Jahr}$ (das Schutzziel gemäss Richtlinie HSK-R-21 beträgt $1 \cdot 10^{-1} \text{ mSv/Jahr}$). Dieser aus heutiger Sicht unrealistische Fall zeigt auf, dass hydraulisch wirksame Störungen eine Sicherheitsrelevanz haben und bei der Standort-evaluation zu beachten sind.

2.4.5 Zusammenfassende Beurteilung zur Hydrogeologie

Die in der Bohrung Benken vorgefundenen hydraulischen, chemischen und isotopengeochemischen Verhältnisse der Tiefengrundwässer unterstreichen eine ausgeprägte vertikale hydrogeologische Stockwerksgliederung. Die drei für ein Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlands bedeutenden Aquifere Malmkalke, Sandsteinkeuper und Oberer Muschelkalk werden durch sehr geringdurchlässige Schichten voneinander getrennt. Diese Stockwerksgliederung macht sich sowohl hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung wie auch bezüglich der Verweilzeiten der Wässer bemerkbar. Eine direkte Verbindung zwischen den einzelnen Aquiferen kann aufgrund dieser Befunde ausgeschlossen werden.

Die Verweilzeiten und der Mineralisationsgrad der Wässer nimmt mit zunehmender Tiefe ab: Im Muschelkalkaquifer wurden die jüngsten Wässer vorgefunden, die Verweilzeiten liegen in der Grössenordnung von wenigen 10^4 Jahren und die Tiefenwässer dürften Anteile eiszeitlicher Wässer enthalten. In den höher liegenden Aquiferen (Sandsteinkeuper und Malm) liegen hingegen hochsaline und wesentlich ältere Wässer vor, für welche mittlere Verweilzeiten im Bereich einiger Hunderttausende bis Millionen von Jahren abgeleitet werden können. Für das Na-Cl-Malmwasser kann aufgrund der chemischen und isotopengeochemischen Befunde gezeigt werden, dass noch Anteile von fossilem Formationswasser marinen Ursprungs vorliegen. Die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Isotopensignaturen weisen auf eine Beimischung von salinem Molassewasser hin.

Die Resultate der Cl-, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -, $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen an Porenwasserproben des Opalinustons und der Rahmengesteine zeigen Konzentrationsprofile, die auf Diffusion als massgebenden Transportprozess hinweisen. Konzeptuell wirken die Aquifere des Malms und des Keupers als geochemische Randbedingungen, die den diffusiven Stoffaustausch zwischen den Grundwässern in den Aquiferen und den Porenwässern im Opalinuston kontrollieren. Die Daten sind von der Nagra sorgfältig dokumentiert und die daraus abgeleiteten Interpretationen nachvollziehbar entwickelt worden. Die gezogenen Schlüsse sind durch unabhängige Evidenzen belegt und damit robust abgeleitet. Die $\delta^2\text{H}$ -, $\delta^{18}\text{O}$ - und Cl-Daten belegen, dass der diffusive Transport von Wasser und Chlorid wegen des stärkeren chemischen Gradienten zur Hauptsache nach unten in Richtung des Keuperaquifers erfolgte. Der für den Wasser- und Stoffaustausch zwischen dem Opalinuston und den angrenzenden Aquiferen entwickelte analytische Modellansatz weist dem Transport für die untersuchten konservativen nicht-sorbierenden Isotope (H, O, Cl) übereinstimmend eine typische Zeitskala von mehreren Hunderttausenden bis Millionen von Jahren zu. Für sorbierende Stoffe dürften die charakteristischen Zeiten noch deutlich höher liegen.

Die Arbeiten der Nagra zu den hydraulischen Eigenschaften des Wirtgesteins sind von hoher Qualität. Die sehr geringen Durchlässigkeitswerte des Opalinustons wurden mit unterschiedlichen Methoden überzeugend nachgewiesen. Aus der Gesamtschau aller von der Nagra dargelegten Resultate zur Hydrogeologie des Opalinustons ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die hydrogeologischen Eigenschaften des Opalinustons im Zürcher Weinland für die Langzeitsicherheit eines allfälligen Tiefenlagers vorteilhaft sind.

Die Berechnungen der ETH (Fidelibus und Löw 2004) zum Wasserfluss durch das Tiefenlager bestätigen die Resultate der Nagra, dass die Wasserflüsse durch die Lagerebene extrem klein sind und der Gesamt-Durchfluss durch die Lagerebene weniger als $0.5 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ beträgt. Die Überprüfungen der ETH zeigen ferner, dass die Wasserflüsse entlang der Untertagebauwerke (Rampe/Schacht) begrenzt bleiben und im Basisfall deutlich kleiner als die

vertikale Gesamtdurchströmung des Tiefenlagers sind. Bei einer massiven Erhöhung der Durchlässigkeit der die Untertagebauten umgebenden Auflockerungszone auf hypothetische K_{EDZ} -Werte = 10^{-8} m/s würden die Wasserflüsse entlang der Endlagerbauwerke zu ähnlichen Werten wie die vertikalen Porenwasserflüsse konvergieren.

Zusammenfassend kann aus Sicht der HSK festgehalten werden, dass der vorgelegte Datensatz ein solides und nachvollziehbares Bild der hydrogeologischen Verhältnisse im Untergrund des Zürcher Weinlands ergeben hat. Obwohl nicht alle Gesteinsformationen im gleichen Umfang und in gleicher Breite hydrogeologisch untersucht wurden, sind die daraus gezogenen Schlussfolgerungen nachvollziehbar und plausibel und erlauben, die grundsätzliche Eignung des Opalinustons als Wirtgestein aus hydrogeologischer Sicht positiv zu beurteilen. Eine Erweiterung und Bestätigung des Datensatzes wird bei einer allfälligen Weiterführung des Projektes im Rahmen der nächsten Bewilligungsschritte erfolgen müssen. Insbesondere wird die Rolle der Rahmengesteine des Opalinustons noch vertiefter zu klären und in die Sicherheitsbetrachtung mit einzubeziehen sein.

2.5 Langzeitentwicklung

2.5.1 Grundlagen der Langzeitanalysen

Die Geosphäre muss einen grundlegenden Beitrag zur Sicherheit eines künftigen geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle liefern. Sie muss einerseits die technischen Barrieren vor äusseren Einflüssen schützen und andererseits bei einer allfälligen Freisetzung von Radionukliden aus dem Tiefenlager für deren Rückhaltung und Verzögerung sorgen. Durch ihre langfristige Stabilität soll die Geosphäre den Schutz des Tiefenlagers über die erforderlichen langen Zeitspannen gewährleisten. Der Ablauf der geologischen Vorgänge in der jüngsten geologischen Vergangenheit und der gegenwärtige Zustand der Erdkruste bilden die Grundlage für Szenarien, mit denen die mögliche zukünftige Entwicklung beschrieben wird. Es geht nicht darum, die Zukunft vorauszusagen, sondern das Spektrum möglicher Veränderungen der Geosphäre aufzuzeigen. Dabei stehen nicht die wahrscheinlichsten Szenarien der zukünftigen Entwicklung im Vordergrund, es interessieren vielmehr die extremen, aber noch plausiblen Entwicklungen mit den grössten möglichen Auswirkungen auf die Sicherheit des Lagers. Diese extremen Vorgänge geben Leitplanken, innerhalb derer sich die zukünftige geologische Entwicklung abspielen wird.

Die natürlichen Ereignisse können in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- Langsam ablaufende geologische Vorgänge (Erosion, Sedimentation, Hebungen etc.).
- Extrem-Ereignisse (Vulkanausbrüche, Stark-Erdbeben, Bergstürze, etc.).

Beide Gruppen sind für die Sicherheitsbetrachtung eines Tiefenlagers relevant. So führen beispielsweise Hebungen und nachfolgende Erosion zu einer Verringerung der Überdeckung des Lagers, während bei Erdbeben abzuklären ist, ob sie die Untertagebauten gefährden, oder das Gestein durchlässiger machen können.

2.5.2 Hebungen und Hebungsraten

2.5.2.1 Geodynamische Grundlagen

Angaben der Nagra

Die Frage, ob sich das Gebiet des Zürcher Weinlandes langfristig hebt, ist von grosser Bedeutung für die Langzeitanalysen der Sicherheit. Die Hebung und die daraus resultierende Erosion vermindern die Mächtigkeit der Deckschichten, die das Lager vor äusseren Einflüssen schützen und die für eine stark verzögerte Ausbreitung allfällig austretender Radionuklide sorgen. Die Nagra hat diese Problematik im Entsorgungsnachweis eingehend abgehandelt.

Als Grundlage einer Beurteilung zukünftiger Hebungsraten hat die Nagra ein geodynamisches Modell entwickelt. Das Modell geht von folgenden Annahmen aus:

- In der Nordschweiz herrscht eine allgemeine, lokal differenzierte Hebung, mit einem Minimum im Gebiet Tafeljura-Hegau. Im angrenzenden Schwarzwald und im Gebiet der Alpen sind die Hebungsraten grösser. Das beobachtete Hebungsregime setzte mit dem Ende der Molassesedimentation vor rund 12 Mio. Jahren ein und dauert bis heute an. Die Nagra nimmt an, dass diese Vorgänge mit der heute ermittelten Rate über längere Zeit weiter andauern werden.
- Sowohl im Grundgebirge wie auch im Deckgebirge herrscht ein Spannungsfeld, dessen maximale horizontale Komponente senkrecht zum Alpenbogen steht. Das Spannungsfeld wirkt in dieser Form seit dem frühen Miozän (ca. 20 Mio. Jahre) und wird auch für die zukünftige Entwicklung des Gebietes bestimmend bleiben.

Ein alternatives Modell, das von einem Abklingen der alpinen Gebirgsbildung ausgeht, erklärt die heute beobachteten Hebungen als isostatische Ausgleichsbewegungen. Das Spannungsfeld wird dabei auf nachwirkende Ausgleichsbewegungen des Alpenkörpers und seines Vorlandes zurückgeführt. Dieses Modell war bis zum Durchbruch der Plattentektonik die vorherrschende Lehrmeinung der Alpengeologen. Da es mit abklingenden Bewegungen und Spannungen rechnet, wäre es für die Langzeitbetrachtungen ein optimistisches Szenarium.

Die heutige Datenlage spricht nach Ansicht der Nagra für einen anhaltenden Zusammenschub der Alpen, doch besteht in der Wissenschaft keine einheitliche Meinung darüber. Die Nagra konzentrierte sich deshalb bei der Analyse der Hebungen auf das Modell einer anhaltenden Kompression mit Fernschub des Deckgebirges, da dieses Modell projektorientiert eine pessimistische Variante darstellt.

Beurteilung der HSK

Die KNE hat im Auftrag der HSK die geodynamischen Konzepte überprüft. Sie stellt fest, dass die Dokumente der Nagra eine gute Synthese von Literaturdaten und selbst erarbeiteten Erkenntnissen darstellen. Angesichts der komplexen geodynamischen Prozesse, die dem Vorgang der Bildung des alpinen Gebirgsgürtels zugrunde liegen, hat sich aber in der Wissenschaft bis heute keine einheitliche Meinung gebildet, ob die Gebirgsbildung andauert oder abgeschlossen ist.

Die geodynamischen Mechanismen, welche seit rund 10 Mio. Jahren zur Hebung des Molassebeckens geführt haben, sind bis heute nur teilweise verstanden. Dies erschwert Prognosen der zukünftigen Vertikalbewegungen. Es handelt sich dabei allerdings um endogene Vorgänge mit Massenumlagerungen in der Erdkruste, die sehr langsam ablaufen. Einigkeit herrscht darüber, dass die Bildung des Jura-gebirges und damit verbunden auch die Auffaltung der subalpinen Molasse durch Fernschub im Zeitraum vor 10 bis 4 Mio. Jahren stattfand. Umstritten ist die Entwicklung danach.

Die Nagra geht davon aus, dass die grössten Hebungen bei aktivem Fernschub zu erwarten sind. Diese Meinung vertritt auch der Experte der HSK (Milnes, 2004), der zudem die Unterschiede des Stressregimes zwischen Bohrlochmessungen im Opalinuston der Bohrung Benken und dem regionalen Stressfeld als Argument für ein Andauern des Fernschubes, d.h. der alpinen Gebirgsbildung anführt. Die KNE weist demgegenüber darauf hin, dass Hebungen und Erosion auch auf einen isostatischen Ausgleich der Lithosphäre im Alpenvorland zurückgeführt werden könnten. Entsprechende Hebungen seit etwa 5 Mio. Jahren wurden aus den alpinen Externmassiven (Aarmassiv) beschrieben. Sie sind grob doppelt so gross wie die gemessenen Hebungen im Zürcher Weinland (Cederbom et al. 2004). Dass solche Hebungswerte im Molassebecken in den vergangenen 2 Mio. Jahren nicht auftraten, zeigen die aus glazialgeologischen Fakten abgeleiteten Hebungsdaten.

Auch wenn die KNE das Modell einer abklingenden Gebirgsbildung bevorzugt, ist die HSK der Meinung, dass die Wahl des Szenariums einer andauernden Gebirgsbildung vernünftiger ist, weil seine Konsequenzen für die Langzeitbetrachtung schwerwiegender sind. Im betrachteten Zeitraum sind bei beiden Modellen im Gebiet des Zürcher Weinlands Hebungen ähnlicher Grössenordnung zu erwarten.

2.5.2.2 Geomorphologische Beobachtungen

Angaben der Nagra

Für die Quantifizierung zukünftiger Hebungen und Hebungsdaten hat die Nagra verschiedene Ansätze gewählt. Mit geomorphologischen Beobachtungen, die einen Zeitraum von rund 5 Mio. Jahren abdecken, wurden langfristig gemittelte Hebungsdaten gewonnen. Die Ableitung der Hebungsdaten beruht auf der Annahme, dass die lineare Erosion entlang der Hauptentwässerungstäler sich im Sinne eines dynamischen Gleichgewichtes laufend den regionalen Hebungen anpasst. Da sich die Anordnung der grossen Talzüge im nordalpinen Gebiet seit etwa 3 Mio. Jahren (spätes Pliozän) nur unwesentlich verändert hat, ist diese Annahme gut begründet.

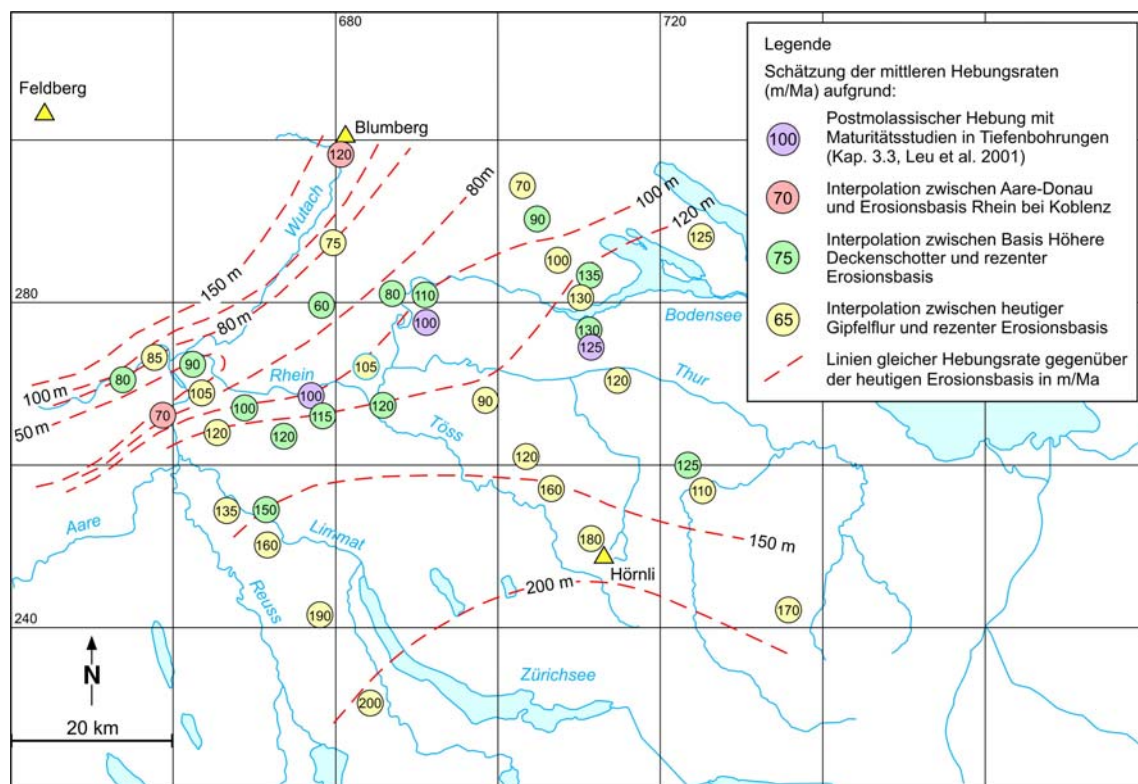
Unter dieser Voraussetzung wurden alte, nun gehobene Landoberflächen ermittelt und mit den heutigen Talböden verglichen. Ältester Talboden ist dabei ein Aare-Donau-Flusssystem, das vor ca. 5 Mio. Jahren durch Hebungen am Schwarzwald-Ostrand unterbrochen wurde. Aus den Daten dieses Systems werden Hebungsdaten von 0.12 mm/a (Blumberg) und 0.07 mm/a (Villiger Geissberg) abgeschätzt.

Eine weitere Bezugsfläche ergibt sich aus dem Vergleich der so genannten Ostschweizer Gipfelflur mit dem heutigen Erosionsniveau. Es handelt sich dabei um die alte Landoberfläche zu Beginn des Eiszeitalters vor rund 2.5 Mio. Jahren. Es wird angenommen, dass zu jenem Zeitpunkt das Nordschweizer Mittelland eine Landschaft mit bescheidenem Relief darstellte. Diese alte Landoberfläche wird heute durch die noch erhaltenen Molassebergzüge

definiert. Aus den ermittelten Höhenkoten kann hier auf Hebungsraten in der Grössenordnung von 0.1 mm/a geschlossen werden.

Es wird angenommen, dass die Höheren Deckenschotter, die zu den ältesten Eiszeitablagerungen der Nordschweiz gehören, über eine eher wenig gegliederte Flusslandschaft geschüttet wurden. Die Reste dieser Geröllschüttungen finden sich heute als Decke über den höchsten Bergzügen der Nordostschweiz. Die Vorkommen liegen praktisch parallel zur Erosionsbasis der heutigen Flusstäler, einzig im Oberlauf des Flusses divergieren die beiden Niveaus leicht, da hier der Ausgleich der Hebung nicht vollständig erfolgt ist. Diese Beobachtungen zeigen, dass sich das Gebiet in einem langfristigen, dynamischen Gleichgewichtszustand befindet, der mit grosser Wahrscheinlichkeit langfristig bestehen bleiben wird. Im Gebiet des Irchel gelang es, Höhere Deckenschotter mit einem Alter von rund 1.8 Mio. Jahren zu datieren. Mit diesem Wert ergeben sich Hebungsraten von 0.08 bis 0.13 mm/a.

Figur 2.5-1 fasst die nach geomorphologischen Kriterien ermittelten Hebungsraten zusammen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der verschiedenen Datensätze. Man erkennt eine SW-NE streichende Zone mit minimalen Hebungsraten von 0.06 – 0.08 mm/a. Das Gebiet Zürcher Weinland liegt südlich dieser Zone, es weist eine Hebungsrate von rund 0.1 mm/a auf, d.h. die Hebungen erreichen 100 m in einer Million Jahren.



Figur 2.5-1: Hebungsraten in Meter pro Million Jahre (m/Ma) nach geomorphologischen und geologischen Kriterien für den Zeitraum spätes Miozän bis Pleistozän (aus NTB 02-03).

Beurteilung der HSK

Geomorphologische Studien bringen wichtige Fakten für die Szenarien der Langzeitentwicklung. Sie beruhen auf Analysen der jungen Sedimentabfolgen des Untersuchungsgebietes. Die Daten repräsentieren eine Zeitspanne von bis zu 5 Mio. Jahren und umfassen damit geologische Zeiträume. Sie sind grundlegend für die Prognosen der zukünftigen Entwicklung des Untersuchungsgebietes. Leider stehen bis heute nur verhältnismässig wenige Datierungen zur Verfügung, so basiert die Einstufung des Deckenschotter-Niveaus auf einer einzigen, allerdings solide mit Fossilien datierten Probe. An den grundsätzlichen Aussagen der Nagra zu den aus geomorphologischen Daten ermittelten Hebungsdaten ist nicht zu zweifeln. Die Daten werden durch vergleichbare Hebungsdaten gestützt, die mit anderen Methoden gewonnen wurden.

Die HSK regt für die zukünftigen Arbeiten an, dass mit weiteren Untersuchungen (Paläomagnetik, Datierung mit Kleinsäugerresten) die Abläufe der Sedimentation und Erosion zeitlich feiner erfasst werden, damit die wichtigen Daten zur Hebung des Gebietes noch besser abgestützt werden können.

2.5.2.3 Geodätische Messungen

Angaben der Nagra

Mit den geodätischen Messungen sollen vertikale Bodenbewegungen im Gebiet direkt nachgewiesen werden. Grundlage sind die Messzüge des Landesnivellements, die im Auftrage der Nagra nachgemessen wurden. Die ersten Messungen des Landesnivellements wurden zwischen 1903 und 1930 gemacht, der Beobachtungszeitraum beträgt also maximal 100 Jahre. Die Messungen beziehen sich auf Referenzpunkte, die für die verschiedenen Messzüge teilweise unterschiedlich sind. Für das vorliegende Projekt sind folgende Referenzpunkte von Bedeutung:

- Aarburg ist der Referenzpunkt des Landesnivellements.
- Für die Nagra-Messungen wurde ein Referenzpunkt im Kristallingestein von Laufenburg gewählt. Dieser Punkt senkt sich gegenüber Aarburg mit 0.18 mm/a. Er hebt sich jedoch gegenüber seiner Erosionsbasis, dem Rhein bei Laufenburg, mit ca. 0.065 mm/a.

Die Auswertung der Nivellement-Messungen widerspiegelt das strukturgeologische Bild der Nordschweiz. Im Südschwarzwald zeigen Grabenstrukturen Senkungstendenz, Horststrukturen Hebungstendenz. Die Aufdomung des Schwarzwaldes geht, wenn auch differenziert, weiter. Insbesondere ist der Bonndorf-Hegau-Bodensee-Graben ein Senkungsgebiet. Im südlich des Schwarzwaldes liegenden Tafeljura beobachtet man eine leichte Senkung oder stagnierende Verhältnisse. Für den östlichen Faltenjura werden Hebungen gegenüber dem Tafeljura ermittelt. Sie könnten ein Andauern der Jurafaltung bedeuten. Dem widersprechen aber Beobachtungen an Karstfüllungen in Jurafalten, die ein Abklingen der Faltungsvorgänge vor gut 4 Mio. Jahren nahe legen (KNE 2005). Im Gebiet Limmattal-Zürichsee korrelieren die Hebungen mit Anti- und Synklinallformen der Molasse, was als Hinweis auf ein Andauern der alpinen Kompressionstektonik verstanden werden kann. Akzeptiert man einen Zusammenhang zwischen Nivellement-Daten und neotektonischen Bewegungen, so ergibt sich der Schluss, dass die alpine Kompression für die Hebungen im Zürcher Weinland verantwortlich ist.

Für das Gebiet des Zürcher Weinlands ergeben sich aus den geodätischen Messungen folgende Hebungsraten:

- Für das Gebiet um Schaffhausen, nördlich der Wildensbucher Flexur und der Neuhauser Störung eine Senkungstendenz von 0.05 – 0.2 mm/a.
- Für das Gebiet südlich des Zürcher Weinlandes (Unteres Thurtal) Hebungen von mindestens 0.1 mm/a.

Weitere wichtige Daten werden von Messungen mit dem GPS-System erwartet. Diese Messungen können auch horizontale Verschiebungen feststellen. Eine Basismessung definierter Punkte wurde 1988 durchgeführt, die Daten der Nachmessungen liegen zurzeit noch in den Fehlerintervallen. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die vertikalen Bewegungsraten sehr klein sein müssen.

Beurteilung der HSK

Die geodätischen Messungen stellen eine Momentaufnahme des heutigen Bewegungsbildes dar. Sie werden seit rund 100 Jahren durchgeführt, so dass für einige Messlinien bereits mehrfache Nachmessungen vorliegen. Die Messungen widerspiegeln ein struktureologisches Bild, das sich auch aus anderen Untersuchungen ergibt. Nicht einfach ist der Vergleich der verschiedenen geodätischen Karten aus Deutschland und der Schweiz, da diese mit unterschiedlichen Referenzpunkten erstellt wurden. Insbesondere zeigen mehrere Publikationen ein ausgedehntes Senkungsgebiet zwischen Untersee und Schaffhausen (Gubler, 1991). In KNE (2005) wird jedoch aufgezeigt, dass die Interpretation grösstenteils auf wenig zuverlässigen Messpunkten beruht. Die KNE kommt zum Schluss, dass die Messungen der Nagra, die sich auf die Auswertungen von Schlatter (1999) stützen, nach den heutigen Erkenntnissen die zuverlässigsten Hebungswerte darstellen. Die HSK schliesst sich dieser Beurteilung an.

2.5.2.4 Beckenmodellierungen

Angaben der Nagra

Die geodätischen Messungen geben Hinweise auf die gegenwärtig ablaufenden Bewegungen. Die geomorphologischen Methoden liefern Daten, die das geologische Geschehen in einem Zeitfenster von einigen Millionen Jahren beleuchten. Mit Beckenanalysen werden Erkenntnisse gewonnen, die die Entwicklung des Sedimentations- und Erosionsgeschehens über einen Zeitraum von rund 200 Millionen Jahren einbeziehen.

Mit der Beckenanalyse wird die Versenkungsgeschichte eines Beobachtungspunktes mit dem sich in geologischen Zeiträumen verändernden Temperaturfeld gekoppelt. Sie liefert damit Angaben über Hebungen und Senkungen in der Vergangenheit und über die Entwicklung des Temperaturfeldes im entsprechenden Zeitintervall. Die Modellierung ist anspruchsvoll, denn es müssen einerseits die in der Vergangenheit erodierten Schichtmächtigkeiten (Erosionsdiskordanzen) abgeschätzt werden, andererseits müssen die Sedimentschichten dekomprimiert, d.h. ihre ursprüngliche Mächtigkeit bei der Ablagerung ermittelt werden. Auch die Paläowärme Flüsse und die Oberflächentemperaturen, welche zeitabhängig sind, müssen berücksichtigt werden. Da diese Grunddaten teilweise unsicher sind, werden sie mit unabhängigen Daten kalibriert.

Für den Raum Benken-Weiach ergaben die Modellierungen zwei Hebungsphasen mit entsprechender Erosion, die folgende Abtragungswerte erreichten:

Alttertiär: 300 – 700 m

Jungtertiär: 700 – 1100 m

Die maximale Versenkung, bezogen auf den Opalinuston, betrug bei Benken 1650 – 1700 m. Das heisst, der Opalinuston lag maximal 1050 m unter seiner heutigen Tiefenlage.

Beurteilung der HSK

Die Beckenanalyse der Nagra entspricht dem üblichen Vorgehen, wie es auch in der Ölindustrie angewendet wird. Wichtig sind dabei die während der Versenkungsphasen erreichten Höchsttemperaturen (Maturität des organischen Materials) sowie deren zeitliche Eingrenzung (Spaltspuren-Analysen). Die angewandte Methodik ist nachvollziehbar und umfasst alle wichtigen Parameter.

Eine gewisse Unsicherheit bietet der Beginn der jungtertiären Hebungsphase, die bis heute andauert (KNE 2005). Die jüngsten datierten Molasseablagerungen, die im sich senkenden Molassebecken sedimentiert wurden, sind etwa 12 Mio. Jahre alt. Zwischen diesem Zeitpunkt und dem Beginn des Quartärs liegt eine Schichtlücke, der Zeitpunkt des Beginns der nachfolgenden Heraushebung ist darum nicht datiert und musste abgeschätzt werden. In den drei Bohrungen Benken, Weiach und Herdern-1 ergab sich übereinstimmend ein Wert von 9.5 – 10 Mio. Jahren. Für Modellierungen hat die Nagra in der Folge einen Beginn der Hebung vor 10 Mio. Jahren angenommen.

Die Hebungsraten für die jungtertiäre Hebung von 0.08 bis 0.15 mm/a im Raum Benken, die aus den Modellrechnungen der Nagra hervorgehen, werden in KNE (2005) als realistisch bezeichnet. Sie liegen im Spektrum der Hebungswerte, die mit den anderen Methoden ermittelt wurden. Die HSK schliesst sich diesem Urteil an.

Für die HSK ist die Annahme einer andauernden Hebung des Zürcher Weinlandes um 0.1 mm/a für den Entsorgungsnachweis vernünftig. In der Stellungnahme der KNE wird der Wert als konservativ bezeichnet (KNE 2005). Wie erwähnt, sind einige Aspekte zurzeit noch Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen. Es ist deshalb angebracht, dass der Fortschritt in diesen Disziplinen beobachtet und neue Entwicklungen in die Langzeitanalysen eingearbeitet werden.

2.5.3 Abtrag und Erosion

Für die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers müssen der flächenhafte Abtrag der Landoberfläche (Denudation) sowie die Entwicklung des lokalen Reliefs durch lineare Tiefenerosion (Flusserosion, glaziale Erosion) als relevante Prozesse betrachtet werden. Verwitterung und Abtrag einer Landschaft werden vom Klimageschehen, vom Geländere Relief und vom Gesteinsuntergrund bestimmt. Zur Denudation gehört auch die chemische Erosion der Gesteine und Böden durch Lösung von Mineralien. Die lokale Reliefentwicklung ist abhängig von der Erosionsresistenz der harten Gesteine und von der Lage der fluviatilen oder glazialen Erosionsbasis.

2.5.3.1 Flächenhafter Materialabtrag: Denudation

Angaben der Nagra

Für langfristige Erosionsszenarien ist die Bestimmung von klima-, relief- und gesteinspezifischen Denudationsraten für das untersuchte Gebiet grundlegend. Die Nagra hat darum für das Gebiet Zürcher Weinland entsprechende Denudationsraten ermittelt. Dabei musste beachtet werden, dass die heutigen Denudationsraten stark anthropogen beeinflusst sind und teilweise um Grössenordnungen über den natürlichen Werten liegen. Verglichen mit den Zeiten des Klimawechsels, z.B. nach Abschmelzphasen der alpinen Vorlandgletscher, sind die heutigen Materialflüsse jedoch stark vermindert. Während der Nacheiszeit (Holozän) hat sich ein an das heutige Klima angepasstes Gleichgewicht eingestellt.

Die Nagra hat die Verwitterungsresistenz der Nordschweizer Gesteine in drei Härtegrade (Denudationsfaktoren) eingeteilt: 0.5 für harte, 1 für mässig harte und 2 für weiche Gesteine. Die Verwitterung hängt vom Klima ab. Die Nagra hat deshalb für vier Klimaszenarien (tropisch-humid, gemässigt, arid, glazial-interglazial) mittlere Werte für den flächenhaften Abtrag in mittelgrossen Einzugsgebieten mit mässigem bis starkem Relief ermittelt. Multipliziert mit dem Denudationsfaktor ergab sich für jedes Klimaszenarium, je nach Verwitterungsresistenz der Gesteinseinheiten, eine mittlere langfristige Denudationsrate. Mit Hilfe dieser Denudationsraten für das Untersuchungsgebiet wurden lokale, geologische Profile mit den Abtragungswerten konstruiert (NTB 99-08, Beilagen 5.1 und 5.3).

Für Regionen mit moderatem bis voralpinem Relief, wie sie die zentrale Nordschweiz darstellt, ergeben sich Abtragungswerte von 0.005 mm/a (Malmkalke), ca. 0.1 mm/a (Molasseformationen) und 0.2 mm/a in quartären Lockergesteinen.

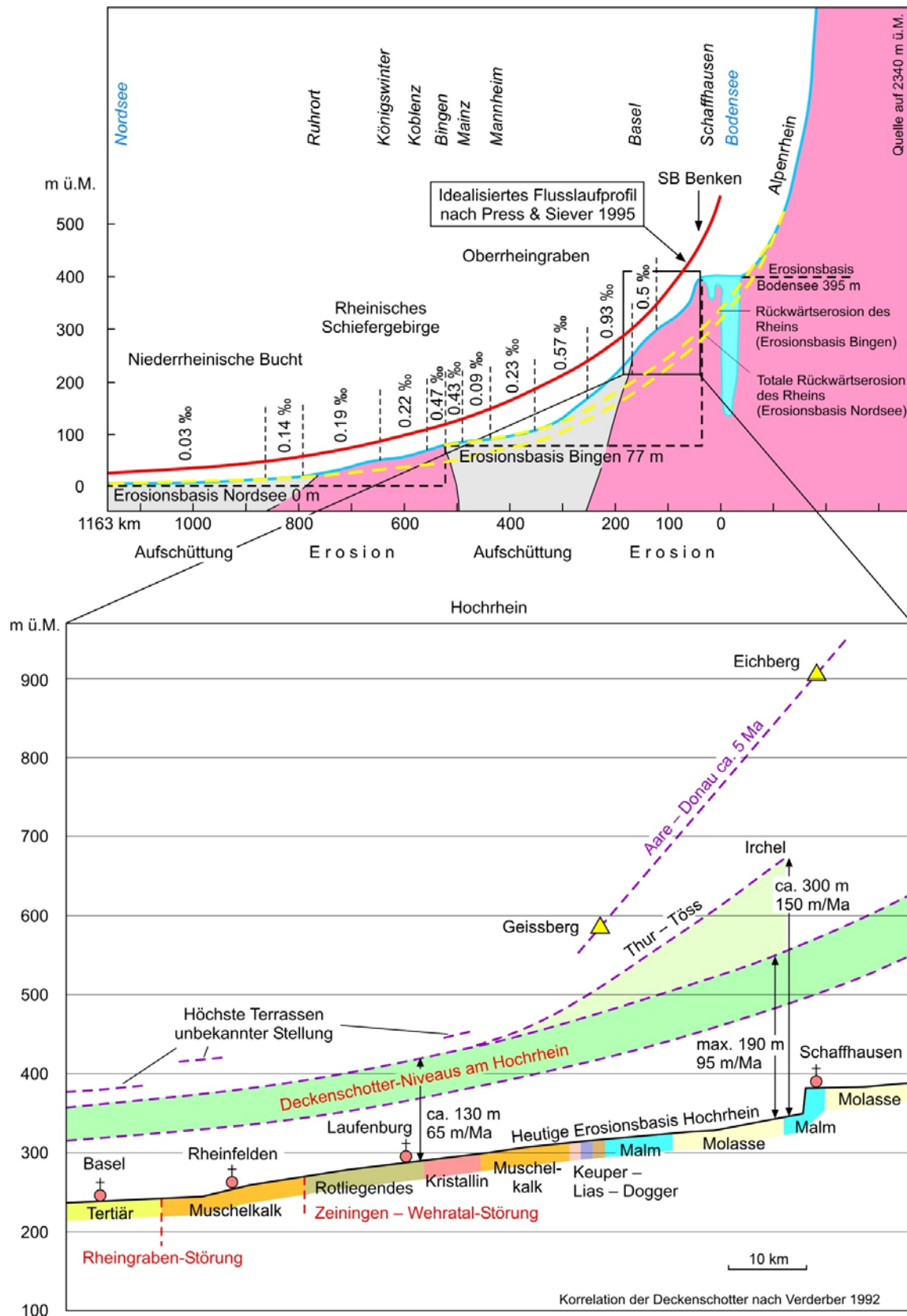
Beurteilung der HSK

Die Einteilung des Nordschweizer Schichtprofils in drei Gesteinhärten, resp. Verwitterungsresistenzen, ist verhältnismässig grob und ergibt konservative Werte für die Denudationsraten, ist aber für die Fragestellung im Rahmen des Standortnachweises ausreichend. Die konservative Betrachtungsweise rechtfertigt sich aufgrund der Unsicherheiten bei den Basisdaten.

2.5.3.2 Flusserosion

Abgaben der Nagra

Die Reliefentwicklung einer Landschaft wird von der Höhenlage der Erosionsbasis gesteuert. Bei geringen Hebungsraten (< 1 mm/a) stellt sich bereits nach weniger als 100'000 Jahren ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Hebung und linearer Tiefenerosion ein. Wird die Erosionsbasis abgesenkt, kommt es zu Rückwärtserosion und rückschreitender Denudation und ein neues Gleichgewicht stellt sich ein.



Figur 2.5-2: Verlauf des Talniveaus des Rheins, 1000-fach überhöht (oben), Beziehung des Deckenschotterniveaus zur heutigen Erosionsbasis im Gebiet des Hochrheins (unten) (aus NTB 02-03).

In der Nordschweiz fließt der Hochrhein zwischen Waldshut und Basel auf erosionsresistentem Mesozoikum und Kristallin (Fig. 2.5-2). Es hat sich deshalb noch kein ideales Flussprofil eingestellt, sondern der Rhein fließt hier über eine Art Schwelle mit höherem Gefälle. Der Hochrhein weist darum ein übersteiltes Flusslaufprofil auf. Vergleicht man das Niveau der Basis der Deckenschotter, die etwa 1 – 2 Mio. Jahre alt sind, so stellt man fest, dass die Gefällskurve der Deckenschotterbasis über weite Strecken annähernd parallel der Gefällskurve des Hochrheins ist (Fig. 2.5-2).

Einzig im Oberlauf sind die Kurven leicht divergierend. Die Gefällskurve des Hochrheins widerspiegelt offenbar einen langfristig stabilen Gleichgewichtszustand, der auch längerfristig Bestand haben wird. Die Nagra verwendet darum diese Höhenlage als Erosionsbasis im gegenwärtigen Flusssystem Hochrhein.

Sollte im Verlaufe der weiteren Entwicklung die Felsschwelle überwunden werden, so würde sich die Erosionsbasis ins Rheinische Schiefergebirge verlegen, mit einer Erosionsbasis bei Bingen. Die Rückwärtserosion würde in der Nordschweiz eine zusätzliche Tiefenerosion von knapp 80 m verursachen. Eine totale Rückwärtserosion bis zur Nordsee brächte weitere 20 m. Im Extremfall könnte somit im Zürcher Weinland eine Tiefenerosion von rund 100 m ausgelöst werden, die eine entsprechende rückschreitende Denudation zur Folge hätte. Dieses Szenario ist aber nur gültig, wenn keine endogenen Bewegungen (Hebungen, Senkungen) das Flusslaufprofil verändern. Mit solchen Bewegungen ist aber zu rechnen.

Innerhalb des herrschenden geodynamischen Regimes ist einzig eine Rückwärtserosion der Steilstufe des Rheinfalls realistisch, die aber erst einsetzen wird, wenn der Bodensee mit Geschiebe aufgefüllt ist, denn nur dann wird genügend Geschiebe mit Erosionspotential im Flusswasser transportiert. Weiter ist zu beachten, dass durch eine nächste Eiszeit das Gewässernetz nachhaltig umgestaltet werden könnte, indem der Rhein seinen Lauf in die Walensee-Zürichsee-Talung verlegen würde. Dies würde er ohne menschliche Eingriffe vermutlich heute schon tun. Dieses Szenarium würde die Tiefenerosion im Zürcher Weinland verringern.

Für die Langzeitanalysen über eine Million Jahre rechnet die Nagra mit folgenden Maximalwerten der fluviatilen Tiefenerosion im Zürcher Weinland: Im Norden des Gebietes 190 m, im Süden 215 m. Die Werte ergeben sich aus der lokalen Hebungsrate und der Rückwärtserosion. In Figur 2.5-3 sind die Auswirkungen der Tiefenerosion auf den geologischen Schnitten dargestellt. Es zeigt sich, dass die Rahmengesteine in der potentiellen Lagerzone in keiner Weise beeinträchtigt werden.

Beurteilung der HSK

Die Untersuchungen der Nagra zur Flusserosion, respektive zur Entwicklung der Erosionsbasis zeichnen ein umfassendes Bild dieser Vorgänge. Die Erosionswerte, die abgeleitet wurden, können nachvollzogen werden. Man muss dabei im Auge behalten, dass es sich bei der Annahme einer Tieferlegung der Erosionsbasis auf das Niveau der Nordsee um ein extrem konservatives Szenarium handelt, das im Zeitraum einer Million Jahre unwahrscheinlich ist.

2.5.3.3 Glaziale Tiefenerosion

Angaben der Nagra

Die glaziale Tiefenerosion ist schwierig zu quantifizieren. Es ist deshalb die Absicht der Nagra, das Lager so tief anzulegen, dass die glaziale Erosion lediglich die für die Sicherheit unbedeutenden Deckschichten beeinträchtigen kann. Die Auswirkungen der glazialen Tiefenerosion wurden von der Nagra wie folgt eingeschätzt.

Die glaziale Erosion hat das Gebiet nicht grossflächig erfasst, es blieben zahlreiche Molasseberge mit einer altpleistozänen Bedeckung (Deckenschotter) erhalten. Die glaziale Erosion hat sich demnach seit dem Altpleistozän in den grossen Talzügen abgespielt.

Im Bereich dieser Hauptentwässerungsrinnen kam es stellenweise zu erheblicher Tiefenerosion, es entstanden übertiefte Becken, die vereinzelt einige hundert Meter unter den heutigen Talboden reichen. Die Nagra nimmt an, dass die übertiefen Becken im jüngeren Pleistozän angelegt wurden, vermutlich als Folge der länger dauernden Kaltzeiten der 100'000 Jahre Zyklen.

Bei wiederholten Gletschervorstössen wurden bevorzugt die alten Talrinnen erneut verwendet, was durch glazial vorbelastete Talfüllungen belegt wird.

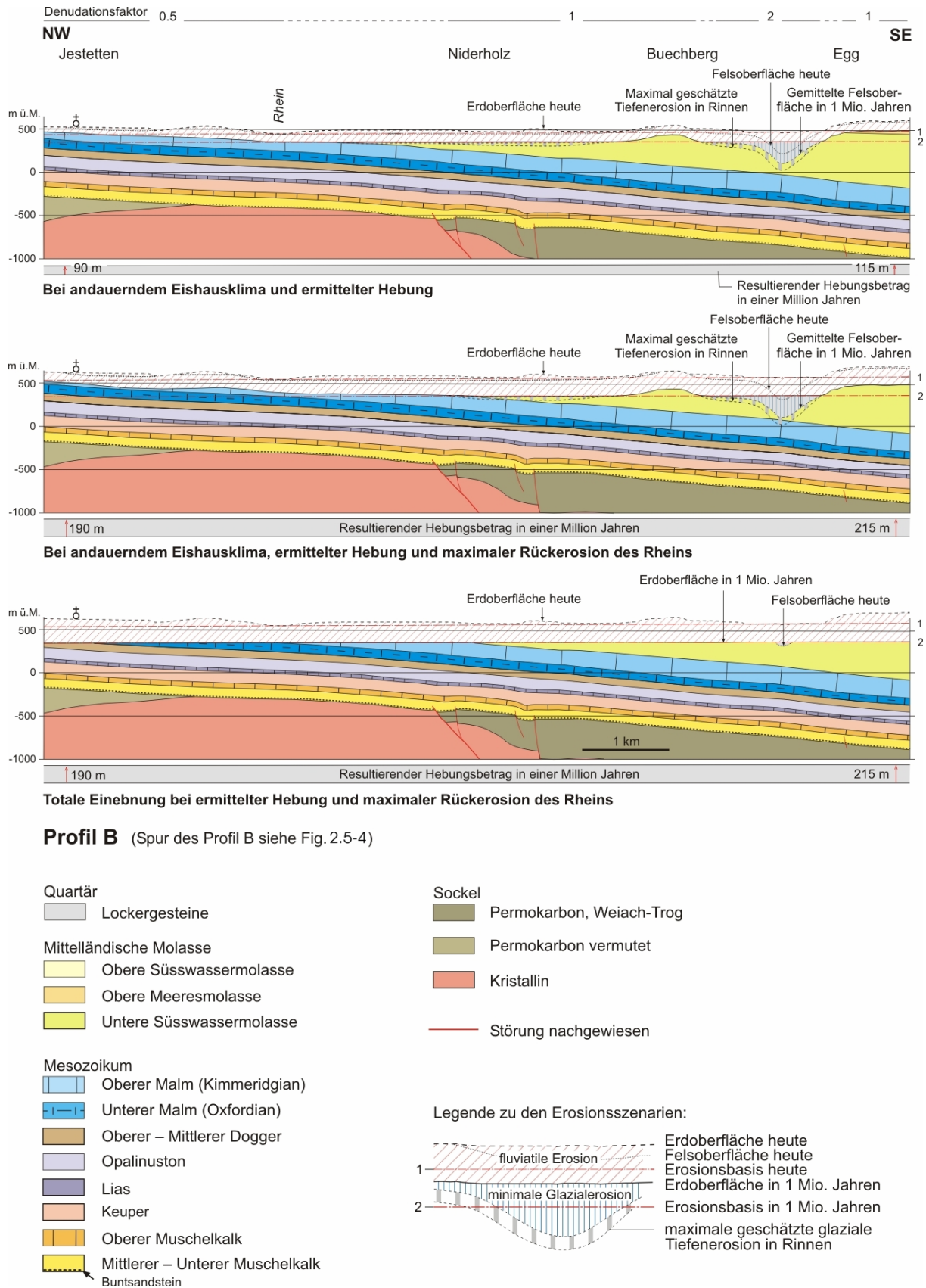
Auf der Grundlage des Datenmaterials (zusammengefasst in NTB 99-08) kam die Nagra zu folgenden Schlüssen betreffend die glaziale Erosion bei andauerndem Eishausklima:

- Die glazial übertiefen Rinnen der Nordschweiz entstanden im Jungpleistozän. Eine weitere Übertiefung durch zukünftige Vorlandgletscher ist wahrscheinlich, erfolgt aber selektiv und nicht bei jedem Gletschervorstoss.
- Die lineare Eintiefung entlang der Haupttäler hält im Bereich mit Molasseuntergrund langfristig mit der regionalen Hebung Schritt.
- Zukünftige Gletschervorstösse folgen bevorzugt bereits existierenden Talzügen, sodass die heutigen Hauptentwässerungsrinnen im Wesentlichen lagekonstant bleiben werden.
- Für die glaziale Übertiefung gelten dieselben formationsspezifischen Faktoren wie für die Denudation. Dies bedeutet, dass im Bereich der Molasse (Denudationsfaktor 1) die glaziale Übertiefung mit der Tieferlegung der fluviatilen Erosionsbasis Schritt hält, im Malm (Denudationsfaktor 0.5) aber höchstens halb so rasch fortschreitet, d.h. wesentlich gehemmt ist (vgl. Fig. 2.5-3).

Beurteilung der HSK

Aufgrund der Bedeutung der glazialen Tiefenerosion hat die HSK zu diesem Thema Expertenmeinungen eingeholt. Diese erweitern in wichtigen Belangen die Ausführungen der Nagra, im Einzelnen ergeben sich folgende Punkte.

Nach Haeberli (2004) entstehen die Alpengletscher der Eiszeiten in einem kühl-feuchten Klima, es handelt sich in dieser Phase um temperiert/aktive, rasch fliessende Gebirgsgletscher. Im glazialen Maximum herrschen kalt-trockene Bedingungen mit wenig aktiven, langsam fliessenden, polythermalen bis kalten, zumindest randlich am Untergrund angefrorenen Gletschern. Aufgrund der kontinentalen Lage des Gebietes herrschen zur Zeit des Hochglazials äusserst trockene Bedingungen.



Figur 2.5-3: Darstellung der Erosionsszenarien am Beispiel eines NW-SE-Profiles vom Rhein- zum Thurtal (aus NTB 02-03).

Numerische Modelle, die die Gletschererosion quantitativ erfassen könnten, sind erst in einfachen Ansätzen vorhanden. Sie zeigen, dass das im externen Randbereich der Vereisungen liegende Zürcher Weinland dabei relativ kurzfristig ($< 20'000$ Jahre) mit Eis von einigen hundert Metern Mächtigkeit bedeckt werden dürfte. Dieses Eis wäre zumindest zeitweise kalt. Die Bildung von peri- und subglazialen Permafrost ist wahrscheinlich, wobei die Mächtigkeit der gefrorenen Zone wohl deutlich unter 200 m bleibt. Mit ausgedehnteren Vereisungen käme das Zürcher Weinland weiter in den wärmeren subglazialen Bereich, was eine geringere Auskühlung des Untergrundes zur Folge hätte.

Die Tiefenerosion wird hauptsächlich durch subglaziales Schmelzwasser verursacht. Dieses ist durch Sedimentfracht und hohe Fliessgeschwindigkeiten in der Lage, das Gletscherbett effizient zu erodieren. Die Tiefenerosion findet demnach entweder in der feuchten Eisaufbauphase im Bereich hinter der Gletscherfront, oder in der Abschmelzphase statt. Hier fallen maximale Abflussmengen an und es werden grosse hydraulische Gradienten aufgebaut, die das erodierte Material abtransportieren können. Während der kühlen Phase des Hochglazials kommen diese Vorgänge praktisch zum Stillstand und es herrscht teilweise Sedimentation.

In seinen Schlussfolgerungen äussert sich Haeberli (2004) auch zur Frage der Bildung neuer Erosionstäler. Er kommt zur Einschätzung, dass unter den zuvor geschilderten Bedingungen die zu erwartende selektiv-lineare Erosion im polythermalen Eisrandbereich die Entstehung völlig neuer Wege der Tiefenerosion im Zürcher Weinland wenig wahrscheinlich macht. Die grössten Unsicherheiten bestehen bei der Tiefenwirkung der subglazialen Grundwasserzirkulation im Randbereich des polythermalen Gletschers und bei der linear konzentrierten subglazialen Schmelzwassererosion (klammartige Rinnen). Diese Phänomene sollten bei den weiteren Untersuchungen vertieft abgeklärt werden. Die Aussage der Nagra, dass die Tiefenerosion weitgehend auf Gebiete mit Molassefels beschränkt bleibt, wird von Haeberli (2004) mitgetragen.

Die HSK kommt aufgrund der vorliegenden Daten zum Schluss, dass eine glaziale Tiefenerosion, die die Umgebungsgesteine des Tiefenlagers frei legen würde, auch bei extremen Annahmen unwahrscheinlich ist. Die heutigen Talsysteme sind offensichtlich schon früh im Pleistozän angelegt worden und haben ihre Lage weitgehend beibehalten. Die Tiefenerosion müsste im Gebiet des Weinlands in den flach liegenden Malmkalken erfolgen, was von allen Experten als wenig wahrscheinlich betrachtet wird, dies auch deshalb, weil die Malmkalke verkarstet sind. Das basale Schmelzwasser würde darum vermutlich weitgehend vom Karst aufgenommen, so dass sich die für die Erosion nötigen hohen Wasserdrücke nicht aufbauen könnten.

Die glaziale Tiefenerosion im Gebiet des Zürcher Weinlands ist für die Ausarbeitung der Langzeitszenarien wichtig. Die Erforschung der glazialen Tiefenerosion (Quartärgeologie) entwickelt sich zurzeit rasant und wird neue Erkenntnisse bringen; es ist darum sinnvoll, die Fortschritte zu verfolgen. Im Falle der Weiterführung des Projekts eines Tiefenlagers im Zürcher Weinland sollte die Nagra im Gebiet der grossen glazialen Übertiefung des unteren Thurtales eine speziell auf die Problematik der dortigen Talgeschichte angesetzte Bohrung abteufen, um weitere Informationen über den Mechanismus der Tiefenerosion zu gewinnen.

2.5.4 Entwicklung des lokalen Reliefs im Zürcher Weinland

Die umfangreichen Untersuchungen zur Tiefenerosion des Gebietes haben den Zweck abzuklären, ob der Gesteinsabtrag die Sicherheitsbarrieren des geologischen Tiefenlagers gefährden kann. Die mit verschiedenen Methoden gewonnenen Daten müssen darum zu einem Gesamtbild vereinigt werden, das alle Teilprozesse berücksichtigt.

Angaben der Nagra

Entscheidend für die Auswirkung der Tiefenerosion ist die Erosionsresistenz der harten Kalkformationen, insbesondere des oberen Malms.

Das Zürcher Weinland liegt inmitten einer Hügellandschaft mit moderatem Relief. Dieser Landschaftstyp hat sich seit dem Ende der Molassesedimentation vor rund 10 Mio. Jahren ausgebildet. Die lokale Erosionsbasis liegt im Thur- und Rheintal bei Kote 350 bis 400 m. Im Randen bilden die erosionsresistenten Malmkalke eine Hochfläche, die etwa 900 m ü.M. liegt. Die „Zeugenberge“ demonstrieren damit gut die Schutzwirkung gegen Erosion, die die weichen Mergelformationen des mittleren Jura unter einem hartem „Kalkdeckel“ erfahren.

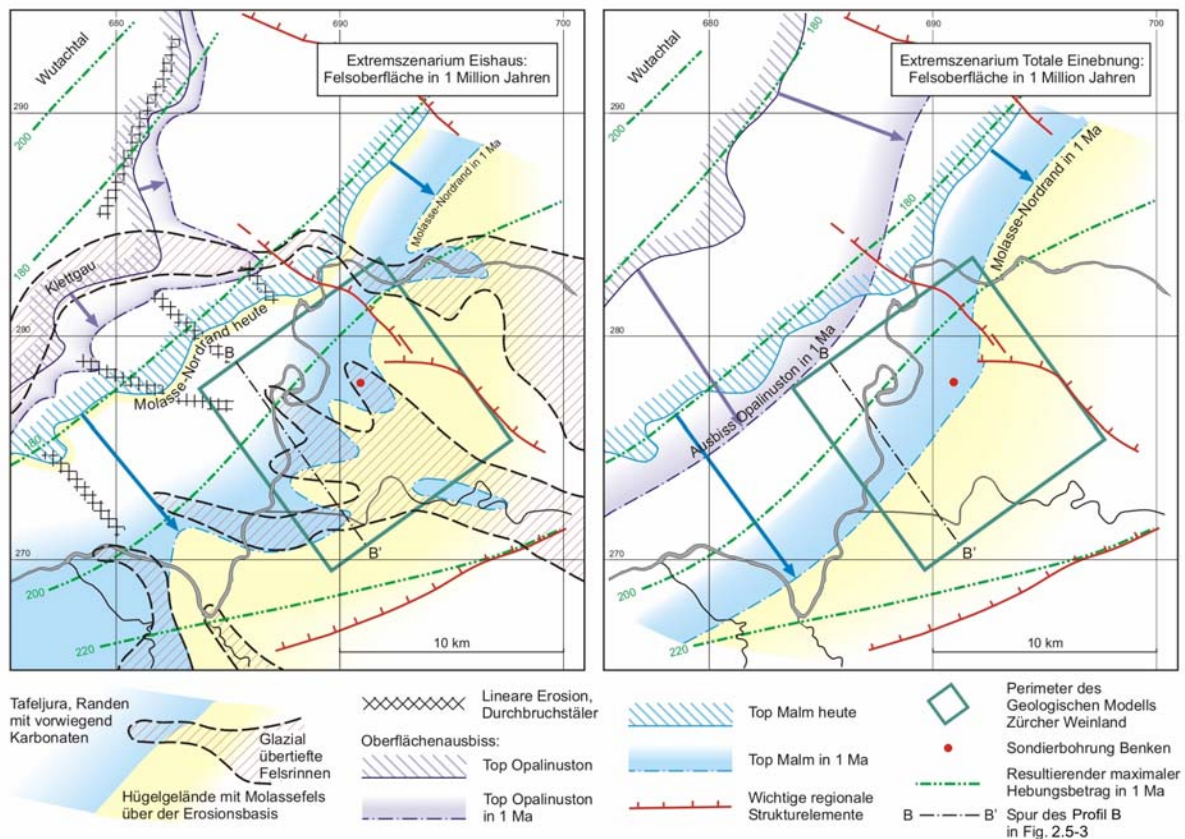
Bei der Reliefentwicklung werden zwei unterschiedliche Extremszenarien betrachtet, beide führen zu einer Freilegung der Malmkalk-Oberfläche im Zürcher Weinland.

Treibhausszenarium: Totale Einebnung und Tieferlegung der Erosionsbasis des Rheins (Rückwärtserosion). Das Szenarium führt zu einer Tieferlegung der Oberfläche um 180 bis 220 m unter das Niveau der heutigen Erosionsbasis. Der Ausbiss der Molasse verschiebt sich dabei um 3 bis 10 km nach Südosten. Etwa 7 km nordwestlich davon läge der Ausbiss des Opalinustons (Fig. 2.5-4).

Eishauszenarium: Eishausklima und maximale Rückerosion des Rheins. Dieses Szenarium führt zu einer Akzentuierung des Reliefs, d.h. es käme zu Einbuchtungen im Erosionsrand der Molasseformationen. Das bedeutet, dass die „Öffnung der Malmkalke“ weiter nach Süden reicht als im Treibhausszenarium. Die Nagra geht beim „Eishauszenarium“ davon aus, dass die lineare Tiefenerosion nach der Tieferlegung der Erosionsbasis durch Hebung und Rückwärtserosion etwa gleich bleibt und dass sich die Eisvorstösse an die bestehenden Übertiefungen halten. Sie kommt zur Schlussfolgerung, dass ein in 650 m Tiefe angelegtes geologisches Tiefenlager auch unter extremen Bedingungen nach einer Million Jahren noch eine Gesteinsüberdeckung von mindestens 450 m aufweisen würde (NTB 99-08).

Beurteilung der HSK

Geologische Prognosen des Spektrums der zukünftig möglichen Entwicklungen der Landschaft sind mit zunehmender Zeitdauer spekulativ. Die Nagra hat darum die Extremszenarien auf eine Zeitdauer von einer Million Jahren erarbeitet. Nach diesem Zeitraum ist die Radiotoxizität der Abfälle schon stark abgeklungen. Die Überlegungen zur Entwicklung des Reliefs zeigen nachvollziehbar, dass in diesem Zeitraum die Überdeckung eines geologischen Tiefenlagers im Opalinuston des Zürcher Weinlands intakt bleibt. Das heisst, es werden nur Schichten entfernt, die für die Sicherheit des Tiefenlagers unwesentlich sind.



Figur: 2.5-4: Extreme Erosionsszenarien für die Nordschweiz. Darstellung der Felsoberfläche in einer Million Jahren unter Annahme der Szenarien „Eishaus“ (links) und „Treibhaus“ (rechts) (aus NTB 99-08).

Wenn im weiteren Verlauf des Programms für die geologische Tiefenlagerung der radioaktiven Abfälle ein Standort ausgewählt wird, so wäre es angebracht, die Erosionsszenarien an diesem Standort auch auf grössere Zeiträume auszudehnen. Bei andauernder Hebung und damit verbundener Erosion könnte nach sehr langer Zeit das Tiefenlager allmählich in die Nähe der Erdoberfläche kommen. Das Nahfeld des Tiefenlagers würde dabei in den Bereich der sauerstoffreichen Grundwässer gelangen. Die im Nahfeld noch vorhandenen sehr langlebigen Radionuklide würden nicht mehr so zurückgehalten bleiben, wie sie es unter den reduzierenden Bedingungen waren, und könnten schneller in die Biosphäre freigesetzt werden. In noch fernerer Zukunft könnte es zu einer Freilegung und Erosion des ehemaligen Lagerbereichs kommen. Es ist in einem weiteren Stadium der Arbeiten angezeigt, solche Szenarien durchzurechnen.

2.5.5 Neotektonik und Erdbeben

Der Begriff Neotektonik umschreibt junge Bewegungen der Erdkruste. In seiner ursprünglichen Definition umfasste er alle tektonischen Bewegungen, die im Zeitraum des Neogens, d.h. innerhalb der letzten 24 Mio. Jahre, stattfanden. In der jüngeren Literatur wird der betrachtete Zeitraum meist der Fragestellung angepasst, häufig wird dabei der Zeitraum seit dem Ende des Miozäns vor rund 5.3 Mio. Jahren verwendet. Im einem Bericht 1985 (NTB 84-26) verwendete die Nagra den Begriff Neotektonik für Bewegungen während der

Quartärzeit bis zur Gegenwart. Dabei geht es darum, Verstellungen von quartären Sedimenten an Störungszonen zu finden, die eine junge Aktivität der Struktur belegen.

Angaben über die jungen Bewegungen können durch direkte Beobachtungen an Störungszonen gewonnen werden (Lineamentstudien, Paläoseismik, etc.). Kenntnisse über die Richtung und Intensität des Spannungsfeldes erlauben es, diejenigen tektonischen Strukturen zu bezeichnen, die ein Potential für junge Bewegungen haben. Auch die Auswertung von Erdbebendaten geben Hinweise auf aktive Störungen und den Ort des Geschehens.

2.5.5.1 Spannungsfeld

Angaben der Nagra

Die Gesteinsspannungen können direkt in Aufschlüssen oder im Bohrloch gemessen werden. Für die Ermittlung des regionalen Spannungszustandes der Erdkruste werden allerdings nur Daten aus tiefen Bohrungen und Herdflächenlösungen von Erdbeben verwendet, da die Oberflächenmessungen häufig durch die Entlastung des Gesteins nahe der Erdoberfläche verfälscht werden.

Aufgrund der Spannungen, die in der Erdkruste herrschen, können Bohrlöcher in Vorzugsrichtung ausbrechen (elliptisches Bohrloch) oder spannungsinduzierte Risse aufweisen. Mit der Analyse solcher Bohrlochrandausbrüche und der induzierten Risse konnte die Richtung der grössten horizontalen Hauptspannung bestimmt werden. Man ermittelte folgende Werte für die zentrale Nordschweiz:

- Im kristallinen Grundgebirge Azimutwerte zwischen 125° und 145°.
- Im Bereich des Permokarbondrogs und in der Sedimentabfolge des Tafeljuras weichen die Werte um ca. 20° bis 30° im Uhrzeigersinn ab, sie liegen hier bei 145 – 175°.
- In der Bohrung Schafisheim beobachtete man im Deckgebirge über dem Abscherhorizont der Jurafaltung eine Richtung von 7°, während man im Grundgebirge einen Wert von 135° beobachtete. Grund- und Deckgebirge sind somit in Schafisheim spannungsmässig entkoppelt, was als Hinweis auf ein Andauern des Fernschubs gedeutet werden kann.

In der Bohrung Benken kamen verschiedene Messverfahren für die Bestimmung des rezenten Spannungsfeldes zum Einsatz. Die Werte von Hydrofrac-Messungen weisen auf Kompression hin, mit einer Richtung 178° für die grösste horizontale Hauptspannung. Einen Hinweis darauf, dass das Deckgebirge im Zürcher Weinland über geologische Zeiträume unter Kompression stand, geben die Horizontalstylolithen (Drucklösungsflächen), die in den Kalken der Abfolge auftreten (Bürgin 2000). Die generelle N-S-Richtung des Spannungsfeldes in Benken wird auch durch andere Methoden bestätigt, wie Bohrlochrandausbrüche, induzierte Risse und Anisotropie der Scherwellengeschwindigkeiten.

Beurteilung der HSK

Die Bestimmung des in-situ Zustandes des Spannungsfeldes im Zürcher Weinland wurde von der Nagra entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik vorgenommen. Das gewonnene Bild ist für den gegenwärtigen Projektstatus (Entsorgungsnachweis) genügend. Die erhobenen Daten passen gut in das regionale geodynamische Bild, das sich aus den

Herdflächenlösungen der Erdbeben ergab. Projektbezogen können darum folgende Feststellungen mitgetragen werden:

- Im Untersuchungsgebiet herrscht ein kompressives Spannungsfeld.
- Die minimale horizontale und die vertikale Hauptspannung sind im Bereich des Opalinustons etwa gleich gross.
- Die maximale horizontale Hauptspannung ist die grösste Normalspannung und beträgt im Bereich des Opalinustons das 1.3 bis 1.5 fache der vertikalen Auflast.
- Die Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung beträgt ca. 180° und ist gegenüber dem mitteleuropäischen Spannungsfeld leicht gedreht.

2.5.5.2 Seismizität

Angaben der Nagra

Die Analyse von Erdbebendaten kann Hinweise auf gegenwärtig aktive Störungszonen, auf Herdmechanismen und auf das herrschende Spannungsfeld liefern. Seit 1975 werden in der Schweiz Erdbeben mit Magnituden grösser 1.6 (Richter-Skala) instrumentell erfasst. 1983 wurde das Netz im Auftrage der Nagra erweitert und auch Gebiete mit geringer Erdbebenaktivität einbezogen. Die Daten der Erdbebenetze zeigen eine Konzentration der Erdbeben auf bestimmte Zonen. So ist das Gebiet des südlichen Rheintalgrabens von Basel und dem Dinkelberg bis zum Hauenstein von einer erhöhten Seismizität betroffen. Eine weitere Zone erhöhter Erdbebenaktivität erstreckt sich vom unteren Teil des Bodensees nach Süden. Schliesslich zeichnen sich auch die Innerschweiz und vor allem das Wallis durch eine erhöhte Erdbebenaktivität aus. Das Gebiet des Zürcher Weinlands liegt in einem Streifen der zentralen Nordschweiz, der während der Messperiode seit 1975 nur wenige Erdbeben aufwies. Die instrumentellen Daten werden von den makroseismisch erfassten Erdbebendaten der letzten 120 Jahre bestätigt. Das Zürcher Weinland liegt demnach in einem seismisch ruhigen Gebiet der Schweiz.

Die Hypozentren der analysierten Erdbeben in der Nordschweiz liegen fast ausschliesslich im Grundgebirgssockel. Etwa zwei Drittel der Ereignisse gehen auf Blattverschiebungen zurück, bei den restlichen sind Abschiebungen die Ursache. Im Mittelland gibt es keine Erdbeben, die auf Aufschiebungen oder Überschiebungen hindeuten würden. Die dominanten Bruchsysteme, die für Erdbeben verantwortlich sind, streichen NW-SE (z.B. Hegau-Bodensee-Graben) oder NNE-SSW. Die ENE-WSW gerichteten Strukturen des Permokarbons zeigen keine rezente Erdbebenaktivität. Das aus den Herdflächenlösungen bestimmte Spannungsfeld steht grob senkrecht zum Alpenrand, es weist von E nach W eine leichte Drehung im Gegenuhrzeigersinn auf.

Beurteilung der HSK

Die Arbeiten der Nagra zeugen von einer sorgfältigen Aufarbeitung der Grundlagen der Seismizität in der Nordschweiz. Die kontinuierlichen Messungen des schweizerischen Erdbebendienstes zeigen, dass das Zürcher Weinland ein seismisch ruhiges Gebiet ist.

Die vorliegenden, historischen Erdbebenkataloge umfassen aber lediglich einen Zeitraum von rund 700 Jahren, instrumentelle Messungen gibt es erst seit knapp 100 Jahren. Bei Sicherheitsbetrachtungen von Tiefenlagern müssen viel längere Zeitintervalle betrachtet

werden. Die Erdbebenkataloge sind für einen solchen Zeithorizont ungenügend. Mit paläoseismischen Methoden konnten in den vergangenen Jahren Informationen über starke Erdbeben im Holozän (letzte 10'000 Jahre) gewonnen werden (Paleoseis 2002). Die Paläoseismik bestätigt, dass die Gebiete des Oberrheingrabens (Basel) wie auch der Innerschweiz über diesen Zeitraum seismisch aktiv waren. Mit einer neuen Erdbebenrisikokarte (Sellami et al. 2003) wird das Risiko im gesamten Gebiet der Schweiz neu eingeschätzt. Das Zürcher Weinland liegt dabei im Gebiet eines geringen Erdbebenrisikos.

2.5.5.3 Auswirkungen von Erdbeben auf die Untertagebauten

Angaben der Nagra

Zur Abschätzung einer seismischen Gefährdung von Bauwerken muss die Verletzbarkeit dieser Bauwerke beurteilt werden. Die Nagra bezieht sich im Entsorgungsnachweis auf eine schwedische Studie von Bäckblom und Munier (2002), die in systematischer Weise weltweit die Informationen zu Erdbebenschäden an Untertagebauten zusammengestellt haben. Das wichtigste Resultat der Studie war die Feststellung, dass bei Untertagebauten Erdbeben wesentlich geringere Schäden verursachen als bei Übertagebauwerken. Bei maximalen Bodenbeschleunigungen an der Erdoberfläche unter 2 ms^{-2} treten untertage keine Schäden auf. Gemäss der Bodenbeschleunigungskarte von Mayer-Rosa (1986) liegt das Zürcher Weinland in einer Zone, in der mit einer Wahrscheinlichkeit von 10^{-3} pro Jahr mit einer Bodenbeschleunigung von $\geq 1 \text{ ms}^{-2}$ gerechnet werden muss. Im Gebiet herrschen demnach heute Bedingungen, die keine Erdbebenschäden an Untertagebauten erwarten lassen.

Selbst Beobachtungen bei Beben mit Magnituden grösser als 6 zeigen, dass bei derart starken Beben in Untertagebauwerken kaum Schäden auftraten. Anfällig für Schäden waren allenfalls die Portalzonen der Untertagebauten, Lockergesteinsabschnitte von Stollen, Stollenteile mit hohen Gebirgsspannungen und vor allem Stollenabschnitte im Bereich aktiver Störungszonen. Seismische Messungen in einer Mine in Japan (Shimizu et al. 1996) haben die empirischen Erkenntnisse mit Messungen bestätigt. So wurde aufgezeigt, dass die an der Erdoberfläche gemessene Bodenbeschleunigung in Tiefenlagen von 600 m um 75 % vermindert wird.

In einem verfüllten Tiefenlager sind die Schäden, die durch die Erschütterungen eines Erdbebens verursacht werden können, vernachlässigbar. Einzig im Bereich reaktiver Störungen sind mechanische Defekte durch Differenzialbewegungen der Gesteinsblöcke denkbar. Gemäss den Untersuchungen von Bäckblom und Munier (2002) nehmen die Gesteinsdeformationen mit der Distanz zur Störung ab, so dass die Ausbildung neuer Brüche auf die unmittelbare Umgebung der Störung beschränkt ist. Die Breite der betroffenen Zone ist vom Standort und von der Störung abhängig, sie kann einige zehn bis hunderte von Metern betragen.

Aufgrund der Lage des Zürcher Weinlands in einem seismisch ruhigen Gebiet und aufgrund der vorgesehenen Massnahmen bei der Platzierung der Einlagerungsstollen, bzw. der Endlagerbehälter (keine Einlagerung im Bereich allfälliger Störungszonen), folgert die Nagra, dass eine Gefährdung der Untertagebauwerke durch Erdbeben auch langfristig vernachlässigbar ist.

Beurteilung der HSK

Die Nagra hat die Problematik der Erdbebenschäden sorgfältig aufgearbeitet. Die Grundlagen dieser Synthesen wurden über rund zwei Jahrzehnte hinweg in Zusammenarbeit mit international anerkannten Seismologen des schweizerischen Erdbebendienstes (SED) ermittelt. Der SED zeigte auf, dass das Zürcher Weinland zu den seismisch ruhigsten Gebieten der Schweiz zählt. Dieser Befund wird auch von zwei unabhängigen Studien bestätigt: Aus der deutsch-österreichisch-schweizerischen Karte der Erdbebengefährdung (Grünthal et al. 1998) geht hervor, dass das Zürcher Weinland zu den vergleichsweise wenig aktiven Gebieten zählt. Dieselbe Schlussfolgerung erlauben ferner die kürzlich veröffentlichten Erdbebengefährdungskarten der Schweiz (ETHZ 2004).

Für die Langzeitsicherheit interessiert vor allem die Stärke des schwersten Erdbebens, welches noch für möglich gehalten wird. Diesem Ereignis müssen die unterirdischen, verfüllten Lagerbauten standhalten, andernfalls müsste das Konzept grundlegend geändert werden. Bei Erdbebenschäden im Zusammenhang mit einem geologischen Tiefenlager muss unterschieden werden zwischen möglichen Schäden an offenen Bauwerken und Schäden an den verfüllten Untertagebauten.

In der Phase der Einlagerung radioaktiver Abfälle sind die Zugangsstollen offen, die Lagerstollen hingegen nur kurzzeitig, da sie nach der Einlagerung der Abfallbehälter umgehend mit Bentonit verfüllt werden. Aufgrund der felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons ist zu erwarten, dass die Stollen auch bei starken Bodenbeschleunigungen infolge eines Erdbebens standfest bleiben werden. Schäden wären nach der erwähnten Studie von Bäckblom und Munier (2002) nur zu erwarten, wenn der Fels eine ausgesprochen schlechte mechanische Qualität aufweisen oder unter hohem Bergdruck stehen würde. Beides ist für den Opalinuston im Zürcher Weinland nicht der Fall. Was die Infrastrukturanlagen betrifft, so können die Bauwerke entsprechend dem heutigen Stand der Technik so bemessen werden, dass sie auch starken Erdbeben standhalten.

Im Endzustand des Tiefenlagers, wenn alle Lagerbauten mit Bentonit verfüllt sind, könnten Schäden nur durch entstehende Brüche durch die Lagerstollen verursacht werden. Eine neuere Studie (Börgesson et al. 2003), die zur Zeit der Abfassung des Entsorgungsnachweises noch nicht vorlag, untersucht konkret, was geschieht, wenn eine neue Störung mit 20 cm Versatz den Stollen im Bereich eines Abfallbehälters durchschlägt. Die Studie zeigt auf, dass der gesättigte Bentonit der Stollenverfüllung als Puffer wirkt, so dass die Verformungen der Behälterwände in akzeptablen Grenzen bleiben. Diese Untersuchungen bezogen sich auf das schwedische Einlagerungskonzept. Beim Konzept der Nagra ist die Bentonitschicht wesentlich dicker, die Resultate wären darum eher besser als beim schwedischen Konzept. Die Nagra hat in den Sicherheitsanalysen die radiologischen Auswirkungen beim völligen Versagen der Behälter berechnet („what if case“). Sie hat dabei aufgezeigt, dass auch in diesem Fall das Dosischutzziel eingehalten wird. Dennoch wäre es aus Sicht der HSK sinnvoll, den Vorgang der erdbebeninduzierten Bruchbildung durch einen Lagerstollen genauer zu untersuchen. Es sei aber darauf hingewiesen, dass bei erkannten Störungszonen im Bereich der Lagerstollen keine Behälter eingelagert werden.

Weiter muss im Auge behalten werden, dass über den betrachteten Zeitraum von rund 1 Mio. Jahren auch in seismisch wenig aktiven Gebieten ein starkes Erdbeben auftreten könnte. Die verfügbare Statistik ist zu kurz, um solche Ereignisse vorauszusagen. Die Experten schätzen die mögliche Stärke eines derartigen Bebens im Gebiet von Mitteleuropa

etwa auf die Magnitude 6 oder knapp darüber. Die dabei möglichen Verschiebungen an Störungen liegen im Bereich der Studie von Börgesson et al. (2003) und würden somit die Behälter nicht wesentlich gefährden. Dazu ist jedoch eine weitere Überlegung wichtig: Ein allfälliger Spannungsaufbau in der Erdkruste des Untersuchungsgebietes würde sich an bestehenden Schwächezonen abbauen. Da fast alle Erdbeben der Nordschweiz im Tiefenstockwerk des kristallinen Sockels entstehen (Herdtiefe > 10 km), wird das auslösende Ereignis sich meist im Sockel ereignen. Man kann darum annehmen, dass der Spannungsabbau an bestehenden Sockelstörungen (Neuhauser Störung, Strukturzone von Niederholz, Flexur von Rafz-Marthalen, vgl. Fig. 2.2-2) erfolgen und sich von dort zum Deckgebirge fortpflanzen würde. Das Tiefenlager sollte deshalb einen Sicherheitsabstand zu diesen Strukturen haben, der nach schwedischen Studien in der Grössenordnung von 100 - 200 m liegt (Bäckblom und Munier 2002, p. 85).

2.5.5.4 Auswirkungen von Erdbeben auf den Grundwasserfluss

Angaben der Nagra

Erdbeben können die Grundwasserverhältnisse beeinflussen. So wurden nach starken Erdbeben (Magnitude 6 und grösser) neu gebildete Grundwasseraufstösse oder auch versiegende Quellen beobachtet. Die Änderungen traten innerhalb eines Zeitraums von Stunden bis zu einem Jahr auf, danach stellten sich in den allermeisten Fällen allmählich wieder die ursprünglichen Verhältnisse ein. Es existieren verschiedene Modelle zur Erklärung dieser Phänomene, die die Beobachtungen mehr oder weniger gut erklären können. Je nach Lage der wasserführenden Schichten und Strukturen im Spannungsfeld würde entweder Wasser wegdrainiert oder ausgepresst. Dass es sich beim aufstossenden Wasser um Tiefenwasser handle, wird aber teilweise in Frage gestellt, es werden eher oberflächennahe Phänomene zur Erklärung herangezogen. In der Nordschweiz gibt es keine Beobachtungen solcher Phänomene. Im Schwarzwald könnten Mineraladersysteme auf von Erdbeben verursachte Paläofluid-Bewegungen zurückgeführt werden, doch sind auch hier die Fakten nicht eindeutig abgrenzbar.

In einem für die Nagra verfassten Bericht hat Hicks (2001) die Kenntnisse bezüglich der Hydrodynamik von Störungen zusammengefasst und eine Auswertung im Hinblick auf seismotektonische Effekte im Opalinuston durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass kleinere Fluidbewegungen an Störungen geeigneter Orientierung nicht gänzlich ausgeschlossen werden können. Allerdings werden diese aufgrund der gut belegten geringen Durchlässigkeit der Störungen im Opalinuston und generell wegen der geringen Zahl von Störungen unbedeutend sein. Dass Mineraladern in Opalinuston-Störungen nur sehr selten auftreten, unterstützt diese Annahme.

Beurteilung der HSK

Veränderungen der Grundwasserverhältnisse durch Erdbeben treten nur bei starken Erdbeben auf. Die sehr alten Porenwässer im Opalinuston zeigen aber, dass es nicht zum Austausch des Wassers im Tongestein gekommen ist, obwohl der Ton in seiner langen Geschichte (Bildung vor rund 180 Mio. Jahren) einige starke Erdbeben erlebt haben muss. Es fehlen auch indirekte Hinweise wie z.B. ausgedehnte Mineraladersysteme, die Grundwasserbewegungen im Tongestein belegen würden. Der Opalinuston verhielt sich somit in hydraulischer Hinsicht trotz solcher Belastungen dicht. Literaturstudien zeigen weiter, dass

allfällige durch ein Erdbeben verursachte Veränderungen von Grundwasserspiegelständen nur von kurzer Dauer sind.

Aufgrund dieser Fakten geht die HSK davon aus, dass Erdbeben keine sicherheitsmässig bedeutenden Änderungen der Grundwasserverhältnisse im Opalinuston des Zürcher Weinlands verursachen können.

2.6 Geothermie und Rohstoffe

Ein Projekt für ein geologisches Tiefenlager schränkt die Nutzung des Untergrundes in der Standortregion ein. Eine mögliche zukünftige Ausbeutung von Rohstoffen und übertiefe geothermische Nutzungen in der Umgebung des Tiefenlagers könnten die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers gefährden. Dabei sind sowohl die gegenwärtig im Vordergrund stehenden wie auch vermutete Rohstoffvorkommen, die zukünftig von Bedeutung sein könnten, von Interesse. Aus der Sicht der Entsorgung radioaktiver Abfälle in einem Tiefenlager sind Standortgebiete ohne Interessenskonflikte mit Rohstoffen vorteilhaft.

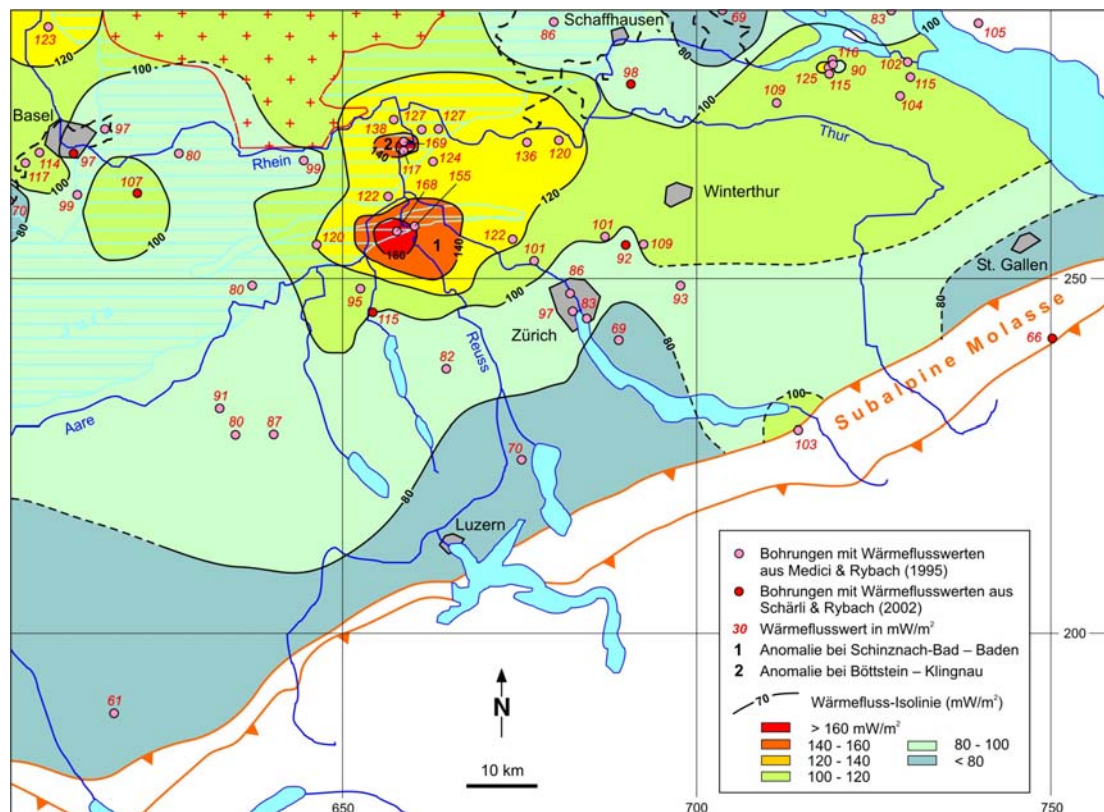
2.6.1 Nutzungskonflikte mit geothermischen Projekten

Angaben der Nagra

Zur Abklärung der geothermischen Verhältnisse hat die Nagra eine Auswertung von 59 Bohrungen in der Nordschweiz verwendet (Schärli und Rybach, 2002). Die Tiefe der Bohrungen lag zwischen 160 m und 5448 m, wobei sie gehäuft in geothermisch prospektiven Gebieten lagen. Es wurde der geothermische Wärmefluss bestimmt und daraus eine Wärmeflusskarte kompiliert (Fig. 2.6-1). Es zeigt sich, dass der Wärmefluss senkrecht zum Streichen der Alpenfront generell gegen Norden zunimmt. Eine Ausnahme ist das Gebiet Schaffhausen – Zürcher Untersee, wo der Wärmefluss geringer ist als in den südlich und westlich anschliessenden Regionen.

Die Gebiete Bad Schinznach-Baden, Böttstein-Klingnau und südlicher Rheintalgraben zeigen andererseits einen stark erhöhten Wärmefluss. Es wird angenommen, dass die Anomalien durch aufsteigendes Tiefengrundwasser verursacht werden. Beim Thermalwasser in Baden-Ennetbaden wird dies auch durch hydrochemische Evidenz bestätigt. Die Anomalien hängen mit den Rändern des Permokarbondrogs zusammen: Tiefreichende Störungszonen am Trogrand öffnen dem Tiefengrundwasser bei besonderen tektonischen Verhältnissen den Weg zur Erdoberfläche. Bei den Anomalien am nördlichen Trogrand kommt der Wasserzufluss aus dem nahen Schwarzwald.

Im Bereich des Zürcher Weinlands wurde keine Wärmeanomalie beobachtet, die Wärmeflüsse liegen hier unter 100 mW/m^2 . Es gibt keine Hinweise auf aufsteigendes Tiefenwasser.



Figur 2.6-1: Wärmeflusskarte der Nordschweiz (aus NTB 02-03).

Beurteilung der HSK

Die HSK stimmt mit der Nagra überein, dass das geothermische Potential im Gebiet Zürcher Weinland eher bescheiden ausfällt. Es ist anzunehmen, dass eine wirtschaftliche Nutzung an besser geeigneten Lokalisationen ausgeführt würde. Im Gebiet des nördlichen Kantons Zürich wird bei geothermischen Projekten in der Regel die Obere Meeresmolasse als Wärmequelle verwendet, die Schichten des Mesozoikums weisen keine entsprechenden Aquifere auf, die die erforderlichen Mengen an warmem Wasser liefern könnten. Der Buntsandstein/Kristallin-Aquifer liegt mit rund 1000 m zu tief für wirtschaftliche Nutzungen. Erdwärmesonden, die im trockenen Fels arbeiten können, sind im Schnitt 150 m tief, sehr tiefe Sonden wurden nur in Ausnahmefällen installiert und sind kaum wirtschaftlich.

Wegen des geringen geothermischen Potenzials des Zürcher Weinlands besteht kaum ein Konflikt hinsichtlich einer durch ein Tiefenlager eingeschränkten geothermischen Nutzung tiefer Schichten. Oberflächennahe Erdwärmesonden könnten auch unter Anwesenheit eines Tiefenlagers erstellt und betrieben werden.

2.6.2 Nutzungskonflikte mit Rohstoffen

Angaben der Nagra

Folgende Rohstoffe wurden von der Nagra im Hinblick auf potenzielle Nutzungskonflikte betrachtet:

Kohle und Kohlegas

Bei den Kohlevorkommen ist zu unterscheiden zwischen dem bergmännischen Abbau der Kohlen und der In-Situ-Vergasung untertage. Kohlevorkommen treten in der Schweiz einerseits in der Sedimentabfolge des Permokarbondrogs auf, andererseits in der Molasse des Mittellandes. Molassekohlen fallen im Gebiet des Zürcher Weinlands ausser Betracht, die Vorkommen an Molassekohlen liegen weiter südlich. Von Interesse sind hier die Kohlen des Permokarbondrogs. In der Bohrung Weiach wurden insgesamt rund 32 m Kohle gefunden. Dabei waren jedoch lediglich 2 Flöze abbauwürdig, die übrigen hatten Aschegehalte von mehr als 20 %, was im Kohlenbergbau als nicht abbauwürdig gilt. Eine bergmännische Förderung von Kohlen des Permokarbondrogs kommt wohl auch wegen der grossen Tiefe der Vorkommen kaum in Frage. Die Kohlenflöze in der Bohrung Weiach hatten andererseits eine hohe Gassättigung, was sie für eine Ausbeutung des Gases von der Erdoberfläche aus interessant macht („Coalbed-Methane“). Diese Art der Gasförderung hat manchenorts heute eine grosse Bedeutung erlangt (Kempter 1994).

Im zentralen Zürcher Weinland (Kristallin-Hochzone von Benken) liegt unter dem Mesozoikum das kristalline Grundgebirge. Kohlenvorkommen wären somit nur im Südteil des Gebietes denkbar, wo der Nordrand des Permokarbondrogs ins Untersuchungsgebiet hineinreicht. Im Norden des Gebietes ist nicht sicher auszumachen, ob Permokarbon vorliegt. Das für den Standortnachweis ausgewählte Gebiet ist jedenfalls von dieser Problematik nicht betroffen.

Kohlenwasserstoffe

In der Nordschweiz wurde während Jahrzehnten Kohlenwasserstoffexploration betrieben. Mit Ausnahme des oben erwähnten „Coalbed-Methane“ haben die Untersuchungen aber bislang keine abbauwürdigen Vorkommen zu Tage gebracht. In der weiteren Umgebung des Zürcher Weinlands wurden 4 Tiefbohrungen abgeteuft (Kreuzlingen-1, Lindau-1, Berlingen-1, Herdern-1), ohne dass abbauwürdige Kohlenwasserstoffe gefunden wurden. Die Gründe waren zu geringe Permeabilitäten der Speichergesteine und fehlende strukturelle Integrität der „Fallen“. Offen bleibt die Kohlenwasserstoffführung des Permokarbons, das nebst Muttergesteinen sowohl potenzielle Speichergesteine, wie auch abdichtende Horizonte enthält.

Wiederum kann festgestellt werden, dass im engeren Untersuchungsgebiet kein Permokarbon vorliegt. Kohlenwasserstoffvorkommen sind deshalb hier nicht zu erwarten.

Salzvorkommen

Die abbauwürdigen Salzvorkommen liegen in der Nordschweiz vor allem am Rhein zwischen Augst und Zurzach. Erfolgreiche Bohrungen gab es auch im Klettgau mit Salzmächtigkeiten von 3 bis 20 m. Die Bohrungen im Gebiet des Randens waren hingegen erfolglos, erst mit der Bohrung Benken wurde erstmals östlich Zurzach Salz erschlossen. Es handelt sich um stark mit Anhydrit und Tonstein versetztes Salz, das deshalb nicht als abbauwürdig bezeichnet werden kann.

Mineral- und Thermalwasser

In der Nordostschweiz sind folgende Tiefenaquifere für die Mineralwassergewinnung von Bedeutung: Obere Meeresmolasse, Untere Süsswassermolasse, Malmkalke, Muschelkalk, Buntsandstein/Kristallin. Als Tafelmineralwasser werden lediglich die Obere Meeresmolasse

(„Aqui“ in Zürich) und die Untere Süsswassermolasse („Eglisau“) genutzt. Die Tiefenaquifere der Oberen Meeresmolasse haben auch eine gewisse Bedeutung als geothermische Wärmequelle.

Im Zürcher Weinland ist die Molasse nur wenig mächtig entwickelt. Es sind nur unbedeutende Aquifere vorhanden. Auch die geothermischen Verhältnisse sind, wie im Abschnitt 2.6.1 bereits aufgeführt, für die Ausbeutung wenig versprechend.

Berteilung der HSK

Im Gebiet des Zürcher Weinlands wurden keine bedeutenden Rohstoffvorkommen festgestellt. Insbesondere auf der für den Entsorgungsnachweis gewählten Kristallin-Hochzone von Benken ist nicht mit Rohstoffkonflikten zu rechnen, da hier kein Permokarbon im tieferen Untergrund auftritt.

Das Salzvorkommen, welches in der Bohrung Benken erschlossen wurde, hat kein Potenzial für eine Ausbeutung, es ist zu stark verunreinigt. Das intensiv mit Tonsteinen und Anhydrit versetzte Salzlager entstand nicht in einer ausgedehnten Salzlagune, sondern es handelt sich um Salzausfällungen in einer Depression, in die periodisch auch Schlammströme eindringen.

2.7 Beurteilung des Standortnachweises

Der erdwissenschaftliche Datensatz, mit dem die Nagra den Standortnachweis führt, ist sorgfältig erhoben und ausführlich dokumentiert worden. Er konnte von der HSK nachvollzogen werden. Die Daten beruhen auf Auswertungen, die dem heutigen Stand der Wissenschaft entsprechen. Es ist der Nagra gelungen, den Zustand der Geosphäre im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland genügend detailliert darzulegen und die für die Sicherheitsberechnungen notwendigen erdwissenschaftlichen Daten bereitzustellen. Eingehende Analysen des geologischen Geschehens in der jüngeren Vergangenheit und in der Gegenwart bilden eine solide Basis für die Abschätzung von Zukunftsszenarien.

Im Zürcher Weinland wurde in geeigneter Tiefenlage ein etwa 15 km² ausgedehnter, für die geologische Tiefenlagerung von abgebrannten Brennelementen, verglasten hochaktiven sowie langlebigen mittelaktiven Abfällen geeigneter Gesteinskörper nachgewiesen. Der Platzbedarf für das Tiefenlager beträgt gemäss Referenzfall der Nagra knapp 2 km². Die geologischen Formationen zeichnen sich durch eine ruhige, annähernd horizontale Lagerung aus, bestehend aus wasserdurchlässigen (Aquiferen) und sehr geringdurchlässigen Schichten (Aquitarden). Die vorgefundenen hydraulischen, hydrochemischen und isotopengeochemischen Verhältnisse der Tiefengrundwässer unterstreichen eine ausgeprägte vertikale hydrogeologische Stockwerksgliederung. Zwischen den Aquiferen des oberen Malms und des Sandsteinkeupers bilden die Schichten des unteren Malms, des Opalinustons, des Lias und des oberen Keupers zusammen ein System von vorwiegend tonig-mergeligen Aquitarden mit einer Gesamtmächtigkeit von rund 270 m.

Das Wirtgestein Opalinuston ist in diesem Bereich rund 110 m mächtig und im regionalen Massstab homogen und einheitlich ausgebildet. Der hohe Gehalt an Tonmineralen und die Dominanz der feinen Korngrößen bewirken eine extrem geringe Wasserdurchlässigkeit des Opalinustons. Hydrochemische und isotopengeochemische Untersuchungen an aus Bohr-

kernen extrahierten Porenwasserproben zeigen, dass es sich bei den Porenwässern im Opalinuston um schichtgebundenes und geochemisch überprägtes Formationswasser handelt. Dieses Formationswasser blieb über Millionen von Jahren hinweg im Opalinuston eingeschlossen und tauschte nur sehr langsam durch Diffusion mit den umliegenden Schichten aus. Die Zusammensetzung der Porenwässer weist darauf hin, dass die charakteristische Zeit für den diffusiven Austausch zwischen den Porenwässern und den angrenzenden Aquiferen im Bereich von mehreren Hunderttausenden bis Millionen von Jahren liegt. Aus den Resultaten der Nagra zur Hydrogeologie und Hydrochemie ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Eigenschaften des Opalinustons im Zürcher Weinland für die Erbringung und den Nachweis der Langzeitsicherheit geeignet sind. Die langen Verweilzeiten der Porenwässer weisen auf ein hohes Einschlussvermögen des Opalinustons hin.

Die tektonischen Bewegungen der jüngeren Erdgeschichte spielten sich an alten, bereits bestehenden Störungen ab, die reaktiviert wurden. Zukünftige Bewegungen werden sich, solange das heutige Spannungsfeld erhalten bleibt, auch an diesem alten Störungsmuster orientieren. Das Tiefenlager kann mit ausreichendem Abstand zu diesen Störungen angelegt werden. Der Opalinuston selbst enthält nur wenige Deformationsstrukturen, die zudem keine erhöhte Durchlässigkeit aufweisen.

Das Untersuchungsgebiet wird aktuell mit etwa 0.1 mm/Jahr gehoben. Diese Hebungsrate wurde mit mehreren unabhängigen Methoden ermittelt; sie dürfte einen Maximalwert darstellen. Die Ursache dieser Hebung wird von den Experten kontrovers beurteilt. Es herrscht aber Einigkeit, dass die Hebungen im betrachteten Zeitraum von einer Million Jahren anhalten und durch Erosion kompensiert werden. Die Erosion wird das geologische Tiefenlager in diesem Zeitraum nicht beeinträchtigen. Die glaziale Tiefenerosion, als das schwerwiegendste Ereignis, kann die Rahmengesteine in diesem Zeitraum nicht abtragen. Es verbleiben nach einer Million Jahren noch rund 450 m Gesteinsüberdeckung über dem Lager bestehen.

Erdbeben stellen aufgrund bisheriger Erfahrungen aus Untertagebauwerken für geologische Tiefenlager ein geringes Risiko dar. Das Zürcher Weinland ist ein seismisch ruhiges Gebiet. Auch bei grösseren seismischen Ereignissen kann von der Standfestigkeit der Untertagebauten ausgegangen werden. Allfällige Bewegungen an bestehenden Störungen sind unerheblich, da in entsprechenden Stollenabschnitten nicht eingelagert würde.

Im Zürcher Weinland wurden keine bedeutenden Rohstoffvorkommen gefunden. Auch das geothermische Potenzial der tieferen geologischen Schichten fällt im Zürcher Weinland gegenüber anderen Regionen eher bescheiden aus. Nutzungskonflikte des Untergrundes sind deshalb kaum zu erwarten.

Die felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons werden im Abschnitt 3.2 im Zusammenhang mit dem Machbarkeitsnachweis beurteilt. Die HSK erachtet die von der Nagra verwendeten Kennwerte als vernünftig abgesichert. Somit sind alle grundsätzlichen Anforderungen für den Standortnachweis erfüllt, namentlich

- 1) genügende Ausdehnung des Wirtgesteins,
- 2) geringe Durchlässigkeit,
- 3) ruhige Lagerung,
- 4) geeignete felsmechanische Eigenschaften,

- 5) geologische Langzeitstabilität,
- 6) keine Nutzungskonflikte mit Rohstoffen.

Nach eingehender Prüfung der in der Geosynthese der Nagra vorgelegten erdwissenschaftlichen Grundlagen kommt die HSK zum Schluss, dass der Standortnachweis im Rahmen des Entsorgungsnachweises für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle erbracht ist. Die Nagra konnte nachvollziehbar nachweisen, dass im Zürcher Weinland in günstiger Tiefe ein genügend grosser Gesteinsbereich des Opalinustons mit den für die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers erforderlichen Eigenschaften vorliegt.

Im Falle der Fortführung des Projekts hinsichtlich der Realisierung eines Tiefenlagers im Opalinuston des Zürcher Weinlands sind folgende erdwissenschaftliche Datengrundlagen mittels entsprechender Untersuchungen zu ergänzen und zu verfeinern:

- Die Rahmengesteine ober- und unterhalb des Opalinustons sollen detaillierter charakterisiert werden, damit das Einschlussvermögen dieser Schichten quantifiziert werden kann.
- Der hydrogeologische Datensatz soll erweitert und bestätigt werden und insbesondere auch die Rahmengesteine umfassen.
- Die Vorgänge der glazialen Tiefenerosion sollen eingehender abgeklärt werden, damit die Möglichkeiten der zukünftigen Auswirkungen durch Modellierungen besser eingegrenzt werden können.

3 Machbarkeitsnachweis

3.1 Beurteilungsgrundlagen

Bei der Beurteilung der technischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers im Opalinuston des Zürcher Weinlandes wird aufgrund der von der Nagra eingereichten Unterlagen geprüft, ob mit den heutigen technischen Mitteln das Lager gebaut, betrieben, überwacht und schliesslich unter Gewährleistung der Langzeitsicherheit verschlossen werden kann. Die Nagra hat dazu entsprechende Angaben im NTB 02-02 sowie in einer grösseren Anzahl unpublizierter technischer Hintergrundberichte dargelegt. Bei ihrer Überprüfung stützte sich die HSK grundsätzlich auf den Stand der Technik und die für Kernanlagen massgebenden gesetzlichen Vorschriften und technischen Normen ab. Als Grundlagen dienten dabei insbesondere der Bundesbeschluss zum Atomgesetz vom 6. Oktober 1978, das Strahlenschutzgesetz vom 22. März 1991, die Strahlenschutzverordnung vom 22. Juni 1994 sowie die Richtlinien der HSK und Normen der SIA.

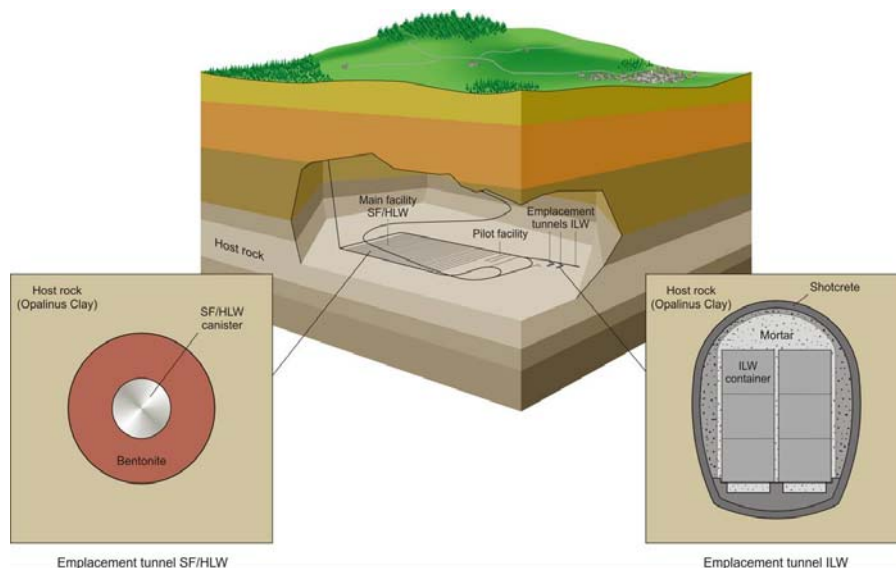
Am 1. Februar 2005 sind das neue Kernenergiegesetz und die zugehörige Kernenergieverordnung in Kraft getreten. Besonders die Kernenergieverordnung enthält eine Anzahl von Anforderungen an ein geologisches Tiefenlager, die der Nagra bei der Erstellung ihrer Berichte in diesem Detaillierungsgrad nicht bekannt waren, bei der Realisierung eines geologischen Tiefenlagers aber zu beachten sein werden. Die HSK äussert sich in ihrer Schlussbeurteilung zu diesem Aspekt.

3.2 Bautechnisches Projekt

Angaben der Nagra

Das Konzept für den Bau und Betrieb eines geologischen Tiefenlagers wird im NTB 02-02 ausführlich beschrieben. Der Bericht zeigt auf, wie ein geologisches Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlandes gebaut und betrieben werden kann. Er äussert sich auch zu den Aspekten der Rückholung von eingelagerten Abfällen sowie zur Überwachung und zum Verschluss des Lagers.

Die Nagra sieht ein bergmännisch erstelltes System von Tunneln und Stollen vor, das in einer Tiefe von rund 650 m im Opalinuston angelegt und über eine Rampe und einen Schacht von der Erdoberfläche aus erschlossen wird (Fig. 3.2-1). Das Lager ist als kontrolliertes geologisches Tiefenlager konzipiert, welches bis zum Verschluss überwacht wird. Das Konzept trägt damit den Empfehlungen der Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle, EKRA, Rechnung (EKRA 2000), die in der neuen Kernenergiegesetzgebung aufgenommen wurden. Die Anlage gliedert sich in oberirdische und untertägige Bauten. Die oberirdischen Anlagen umfassen u.a. ein Administrativ- und Betriebsgebäude, eine Konditionier- und Verpackungsanlage, eine Geräteschleuse, ein Lüftungsgebäude, einen Förderturm und eine Geräte- und Materialhalle. Die unterirdischen Anlagen beinhalten einen Zugangstunnel (Rampe) und einen Schacht sowie auf Lagerebene das Hauptlager, das Testlager und das Pilotlager (Fig. 3.2-2).

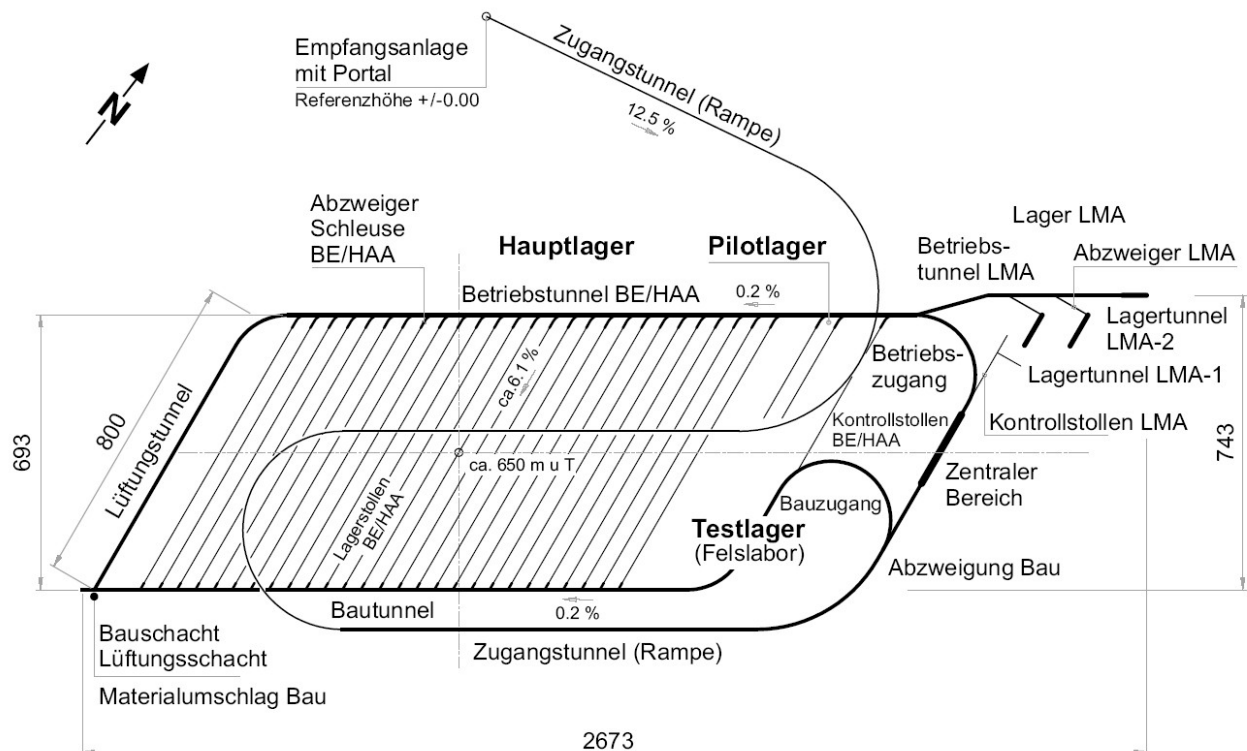


Figur 3.2-1 : Konzept eines geologischen Tiefenlagers im Opalinuston des Zürcher Weinlandes (aus NTB 02-05).

Das Hauptlager ist für die Aufnahme der abgebrannten Brennelemente (BE) und der verglasten hochaktiven Abfälle (HAA) sowie der langlebigen mittelaktiven Abfälle (LMA) bestimmt. Es besteht aus 27 Einlagerungsstollen für BE/HAA (Ausbruchquerschnitt 4.9 m^2) von je 800 m Länge, die in einem Abstand von 40 m nebeneinander in N-S Richtung angeordnet werden. Für LMA sind drei Lagertunnels von 90 m bzw. 60 m Länge vorgesehen mit Ausbruchquerschnitten von 63 m^2 bzw. 26.5 m^2 .

Das Testlager ist ein Felslabor mit verschiedenen Testbereichen und dient dazu, die für die Sicherheitsanalyse erforderlichen Daten vor der Aufnahme des Lagerbetriebes zu erheben. Neben den Daten zur Langzeitsicherheit sollen auch weitere Angaben zum Lagerbau und Einlagerungsbetrieb gewonnen werden.

Im Pilotlager wird ein kleiner, aber repräsentativer Teil der Abfälle eingelagert. Anschliessend wird das Pilotlager verfüllt und versiegelt. Es dient der Überwachung des Langzeitverhaltens des Barrierensystems und der Überprüfung der in der Sicherheitsanalyse verwendeten Prognosemodelle und liefert Entscheidungsgrundlagen für den späteren Verschluss der Gesamtanlage. Es soll die frühzeitige Erkennung allfälliger unerwünschter und nicht vorgesehener Entwicklungen erlauben.



Figur 3.2-2: Übersicht über die untertägigen Anlagenteile des Tiefenlagers (aus NTB 02-02).

Die Realisierung der Anlage soll in drei Bauetappen über einen Zeitraum von insgesamt 30 Jahren erfolgen. Die Planung sieht vor, dass der Einlagerungsbetrieb etwa 12 Jahre nach Baubeginn aufgenommen werden kann. Die erste Bauetappe betrifft die Exploration unter Tage und umfasst den Bau eines etwa 5 km langen Zugangstunnels (Rampe) sowie den Bau eines Felslabors (Testlager) auf Lagerebene in ca. 650 m Tiefe. In der zweiten Etappe erfolgt die Erstellung des Bau- und des Betriebstunnels, welche zusammen den Lagerbereich für BE/HAA umschliessen, der LMA-Lagertunnel, des Pilotlagers und der dazu notwendigen oberirdischen und unterirdischen Anlagen (Bauwerke im Portalbereich, Anlagen im Schachtkopfbereich, Lüftungs- und Bauschacht, Zentraler Bereich mit Infrastrukturanlagen). Die dritte Etappe umfasst den Einlagerungsbetrieb im LMA-Lager, die Beschickung und den Verschluss des Pilotlagers sowie die Lagererweiterung durch den schrittweisen Bau der BE/HAA-Lagerstollen mit anschliessender Einlagerung der HAA und BE. Aus sicherheitstechnischen Gründen werden keine BE/HAA-Lagerstollen auf Vorrat erstellt. Dies bedingt ein auf den Einlagerungsbetrieb abgestimmtes und während des Einlagerungsbetriebs zu erfolgendes Auffahren der jeweils benötigten BE/HAA-Lagerstollen. Die Lagerstollen werden nach Einlagerung der BE/HAA umgehend verfüllt und versiegelt.

Der Zeitaufwand zur Beschickung der LMA-Lagertunnel und des Pilotlagers wird von der Nagra auf zwei Jahre, jener für die BE/HAA-Lagerstollen auf rund 15 Jahre geschätzt. Bei 27 BE/HAA-Lagerstollen werden somit pro Jahr etwa zwei Lagerstollen gebaut. Mit dem Ver-

schluss des Pilotlagers beginnen die ersten Überwachungsmessungen bereits während des weiterlaufenden Einlagerungsbetriebs und der Erweiterung des Hauptlagers. Nach Abschluss der Einlagerung sämtlicher Abfälle werden der Bau- und der Betriebstunnel, der Lüftungstunnel und der Bauschacht nach einer gewissen Zeit verfüllt und versiegelt; die Betriebsphase geht über in die Überwachungsphase. Der Zugang zum Zentralen Bereich und zu den Kontrollstollen des Pilotlagers bleibt über die Rampe weiterhin offen. Der Entscheid darüber, wann die Überwachungsphase beendet, sämtliche noch verbleibende Hohlräume verfüllt und das Tiefenlager endgültig verschlossen werden soll, wird zukünftigen Generationen überlassen.

Die bautechnische Machbarkeit des Tiefenlagers wird in Kapitel 4 von NTB 02-02 durch eine Beschreibung der vorgesehenen baulichen Schritte und der technischen Massnahmen dargestellt. Die Nagra legt dabei das Schwergewicht der Bearbeitung auf bautechnische Aspekte, die sich beim Untertagebau im Opalinuston stellen. Sie führte dazu detaillierte felsmechanische Berechnungen und geotechnische und felsmechanische Abklärungen u.a. im Felslabor Mont Terri durch. Aufgrund der grossen Erfahrung im Untertagebau in der Schweiz stand die Machbarkeit der Zugangsbauwerke für die Nagra nicht in Frage und wurde deshalb im NTB 02-02 nur summarisch beschrieben.

Ausgehend von den Spannungsverhältnissen im Gebirge und den felsmechanischen Kennwerten des Opalinustons legt die Nagra in NTB 02-02 ihre Überlegungen zur Anordnung und Dimensionierung der Untertagebauwerke dar. Aufgrund der anisotropen Spannungsverteilung und mit dem Ziel, in den BE/HAA-Lagerstollen möglichst wenig Stütz- und Sicherungsmittel einbauen zu müssen, wurden die Lagerstollen in Richtung der maximalen horizontalen Spannung (N-S Richtung) angelegt. Dieselben Überlegungen galten auch für die Anordnung des Pilotlagers.

Bezüglich Ausbruchverfahren und Felssicherung der Untertagebauwerke geht die Nagra im Einzelnen auf jedes Element des Lagersystems ein. Für den Bau des Zugangstunnels (Rampe) sieht die Nagra einen konventionellen Sprengvortrieb oder allenfalls auch teilweise den Einsatz einer Teilschnittmaschine vor. Dieser Tunnelabschnitt soll je nach Wasserverhältnissen mit einem ein- oder zweischaligen Betoneinbau gesichert werden. Die Bau- und Betriebstunnel im Opalinuston sollen mittels einer Teilschnittmaschine oder evtl. mit einem schonenden Sprengverfahren aufgefahren, die BE/HAA-Lagerstollen hingegen mit einer Tunnelbohrmaschine erstellt werden. Die Felssicherung erfolgt in den Lagerstollen mittels Felsanker und Stahlnetzen, für die Bau- und Betriebstunnel ist eine Auskleidung mit armiertem Spritzbeton vorgesehen. Für den Bau des Lüftungsschachtes sieht die Nagra das sog. Raisedrill-Verfahren vor, bei welchem in einem ersten Schritt in der Schachtachse eine kleinkalibrige Vorbohrung abgeteuft und anschliessend das Bohrloch von unten nach oben mit dem Raisebohrer auf den vollen Schachtdurchmesser aufgeweitet wird. Sollte sich nach der Vorbohrung das Raisebohrverfahren als zu riskant erweisen, erwägt die Nagra für den Schachtbau einen konventionellen Sprengvortrieb (von oben nach unten).

In ihrer Gesamtbewertung kommt die Nagra zum Schluss, dass der Bau eines geologischen Tiefenlagers im Opalinuston des Zürcher Weinlandes in der vorgesehenen Tiefenlage von rund 650 m aufgrund der durchgeführten felsmechanischen Berechnungen mit den heute vorhandenen Technologien machbar ist. Das modulartige Anlagenkonzept bietet nach Ansicht der Nagra genügend Flexibilität, um bei Bedarf die Anlage auch an neue Erkenntnisse anpassen zu können.

Beurteilung der HSK

Für die Überprüfung der bautechnischen Machbarkeit des Tiefenlagers im Opalinuston des Zürcher Weinlandes hat die HSK einen Auftrag an ihren Experten Emch+Berger, Ingenieure und Planer, Bern, erteilt. Der Expertenbericht (Emch+Berger 2005) geht ausführlich auf die felsmechanischen Verhältnisse im Opalinuston und auf die bautechnischen Aspekte des Tiefenlagers ein und beurteilt dessen Auslegung und Realisierung. Da die BE/HAA-Behälter zu einer Erwärmung der Stollenverfüllung des Opalinustons und der Nebengesteine führen, hat der Experte auch die möglichen Auswirkungen dieses Wärmepulses auf das Bauwerk und auf das Gebirge mittels einer thermisch-hydraulisch-mechanischen Modellierung untersucht. Die nachfolgende Beurteilung der HSK stützt sich auf die Feststellungen des Experten ab.

Gebirgsspannungsverhältnisse und ihre Bedeutung für den Lagerbau

In Gebieten mit flachem Relief werden die Gebirgsspannungen im Wesentlichen durch die Lagertiefe, die tektonischen Verhältnisse, das regionale Spannungsfeld und die Gesteinseigenschaften bestimmt. Die Lagertiefe gibt das Gewicht der Auflast und damit die vertikalen Spannungen vor. Für die Bestimmung der horizontalen Spannungsverhältnisse führte die Nagra in der Bohrung Benken in-situ-Messungen durch (Hydrofrac-Spannungsmessungen, Auswertung von Bohrlochrandausbrüchen und von induzierten Rissen in der Bohrlochwand).

Für die Referenztiefe des Lagers von 650 m hat die Nagra in der Bohrung Benken folgende Spannungsverhältnisse bestimmt (NTB 02-03, Tab. 4.4-1):

Vertikalspannung infolge Auflast σ_v	15.9 MPa $\pm$ 5 %
Maximale horizontale Hauptspannung σ_H	22.6 MPa $\pm$ 10 %
Minimale horizontale Hauptspannung σ_h	15.1 MPa $\pm$ 5 %
Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung	170 ° $\pm$ 10 °

Eine von der Nagra in Auftrag gegebene Überprüfung des Datensatzes (Bock 2004) bestätigt im Grundsatz die dargelegten Spannungsverhältnisse. Der Autor bewertet hingegen die Fehlerbandbreiten der vorgelegten Messergebnisse als etwas grösser. Danach dürfte die Messgenauigkeit bei der Bestimmung von σ_H im Bereich von 15-20 % (anstelle von 10 %) liegen.

Die Ausrichtung der BE/HAA-Lagerstollenachsen wurde von der Nagra parallel zur grösseren horizontalen Hauptspannung gewählt. Damit kann ihre Standfestigkeit am Hohlraumrand mit einem Seitendruckverhältnis von nahezu 1 angesetzt und eine maximal mögliche Ausnutzung der Materialfestigkeit des anstehenden Opalinustons erreicht werden.

Nach Ansicht der HSK erfolgte die Bestimmung der Spannungsverhältnisse entsprechend dem Stand der Technik. Das vom Spannungszustand gewonnene Bild steht im Einklang mit den bisherigen Datensätzen der Nordschweiz. Die Anordnung der Lagerstollen ist aus heutiger Sicht zweckmässig und für den Machbarkeitsnachweis genügend. Sollte das Tiefenlager im Zürcher Weinland realisiert werden, müsste der ermittelte in-situ-Spannungszustand vor Baubeginn validiert werden.

Felsmechanische Eigenschaften des Opalinustons

Für den Bau des Tiefenlagers sind die felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons von grosser Bedeutung. Für bautechnische Berechnungen und Belange sind vor allem folgende Parameter bzw. Prozesse wichtig:

- E-Modul (Be- und Entlastungsmodul bzw. Wiederbelastungsmodul): Verformungsverhalten, Stabilität des Hohlraums
- Spitzen- und Restscherfestigkeiten: Festigkeitsverhalten des intakten Gebirges und des Gesteins auf Trennflächen und entlang der Schichtung
- Druck- und Zugfestigkeit: Materialverhalten am Hohlraumrand, Anhaltswerte für einzubauende Sicherungsmittel
- Quellparameter: Materialverhalten bei Wasserzutritt, Quelldruck und –verformung
- Zeitabhängiges Deformationsverhalten (plastische Deformation, Kriechen)
- Porenwasserdruck und Wassergehalt

Die ausgeprägte Anisotropie im Opalinuston infolge der Schichtung, der makroskopischen Wechsellagerung von toniger und sandiger Fazies sowie der mikroskopischen Ausrichtung der Tonmineralplättchen wirkt sich auf annähernd alle massgebenden Festigkeits- und Verformungsparameter aus. Die Quellfähigkeit des Opalinustons beruht auf der Einlagerung von Wasser in den Zwischenschichten der Tonminerale und ist abhängig von deren mineralogischer Zusammensetzung. Die prognostizierten Quelldrücke im Opalinuston können 2-4 MPa betragen, wobei die Quelldrücke sich nur bei behinderter Ausdehnung aufbauen. Sobald der Quellvorgang unbehindert stattfinden kann, erfolgt eine Entfestigung des Gesteins. Die in Laborversuchen bestimmten einaxialen Druckfestigkeiten des Opalinustons sind stark vom Wassergehalt, der Probengrösse wie auch der Belastungsrichtung (senkrecht, parallel, schräg zur Schichtung) abhängig. Die Nagra hat den Einfluss des Wassergehaltes auch in Relation zu anderen Erkundungsbohrungen und den Werten aus dem Felslabor Mont Terri analysiert und berücksichtigt.

Aus Sicht der HSK können die felsmechanischen Eigenschaften und Kennwerte des Opalinustons für die Belange des Machbarkeitsnachweises als vernünftig abgesichert betrachtet werden. Sie sind durch zahlreiche Labormessungen an Gesteinsproben der Bohrung Benken sowie durch Versuche und Rückrechnungen im Felslabor Mont Terri belegt und bilden eine verlässliche erste Grundlage für die Modellierung des felsmechanischen Verhaltens beim Bau des geologischen Tiefenlagers. Eine genauere Eingrenzung der felsmechanischen Parameter und somit Verringerung der Streubreiten für den Opalinuston wie auch für die darüber liegenden Schichten wird im Zuge der nachfolgenden Projektphasen erfolgen können.

Für die felsmechanischen Berechnungen im Opalinuston werden von der Nagra in Abhängigkeit von der Zielsetzung der Berechnung verschiedene Materialgesetze verwendet. Neben einem linearen Mohr-Coulomb-Ansatz wird auch ein bi-lineares Materialgesetz von Mohr-Coulomb jeweils mit Zugspannungsbegrenzung für Festigkeitsbetrachtungen verwendet. Die beiden Ansätze sind nach Ansicht der HSK in Anbetracht des komplexen und stark anisotropen Festigkeitsverhaltens des Opalinustons angemessen und sinnvoll gewählt.

Auslegung des Tiefenlagers

Die HSK beurteilt das vorgeschlagene Layout der Anlage als zweckmässig. Es enthält entsprechend dem Planungsstand einer generellen Machbarkeitsstudie alle benötigten Bauwerksbestandteile. Die grundsätzliche Anordnung der verschiedenen Anlageteile ist auch mit geologischen Endlagerprojekten anderer Länder vergleichbar. Die zu Grunde gelegten Bauzeiten für das vorliegende Layout des Lagers beurteilt die HSK als realistisch und machbar.

Im Falle einer Realisierung des Lagers möchte die HSK auf folgende Punkte hinweisen:

- Bei einem konkreten Bauprojekt sind die Bauwerke der Aussenanlagen sowie die oberflächennahen Teile des Tiefenlagers entsprechend ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung gemäss der Richtlinie HSK-R-04 zu klassieren und mit Hilfe der SIA-Normen zu bemessen. Mit der Klassierung wird das Niveau der Erdbebengefährdung festgelegt.
- Hinsichtlich der Linienführung des Zugangstunnels (Rampe) sieht die HSK noch gewisse Optimierungsmöglichkeiten. Nach Ansicht der HSK ergäben sich bezüglich der Wasserhaltung und der Lüftung wesentliche Vorteile in einer Verknüpfung des Zugangstunnels mit dem Lüftungs- und Bauschacht auf verschiedenen Tiefenlagen.

Die Dimensionen der vorgeschlagenen Tunnel-, Stollen- und Schachtquerschnitte sind für den Bau und den Betrieb des Lagers teilweise eher knapp. Die von der Nagra ergänzend zum Projektbericht NTB 02-02 vorgelegten neuen Vorschläge (Electrowatt 2004) mit grösseren Querschnitten für den Zugangstunnel (Rampe) sowie den Lüftungs- und Bauschacht erachtet die HSK für alle vorgesehenen Bauetappen und Betriebsphasen als vernünftige Mindestwerte. Der grössere Querschnitt für den Zugangstunnel ermöglicht den Begegnungsverkehr und gewährleistet damit eine verbesserte Logistik und eine höhere Sicherheit für die verkehrenden Fahrzeuge im Tunnel.

Der neu vorgeschlagene grössere Schachtquerschnitt in Kombination mit der Skipförderung (Gefässförderung) erlaubt nur bedingt Transporte von sperrigem und schwerem Baumaterial durch den Schacht. Die geplante Trennung zwischen Baubetrieb durch den Schacht und Einlagerungsbetrieb durch den Zugangstunnel ist deshalb nicht vollständig möglich. Die HSK empfiehlt deshalb, die Tunnel- und Schachtquerschnitte in der nachfolgenden Planungsphase auf der Grundlage des benötigten Betriebslichtraumprofils, der Linienführung, der Bauverfahren und der zu erwartenden Konvergenzen zu optimieren.

Bauverfahren und Wasserhaltungskonzept

Die gewählten Bauverfahren für Ausbruch, Schutterung und Sicherung beurteilt die HSK als grundsätzlich machbar. Im Falle der Realisierung des Projektes sollten nach Ansicht der HSK folgende Aspekte noch näher geklärt werden:

- Zweckmässigkeit des Raisedrill-Verfahrens: Diese Methode hat den Nachteil, dass die Felssicherung und der Einbau der Schachtauskleidung erst nach Abschluss des Bohrverfahrens erfolgen kann und ein sofortiges Reagieren bei Problemen der Standfestigkeit des Gebirges und der Wasserhaltung eingeschränkt ist.
- Wasserhaltungskonzept: Zum Layout der Wasserhaltung vertritt die HSK die Auffassung, dass Wasser aus den überliegenden Deckschichten nicht bis in den Opalinuston hinunter geführt werden darf: Das könnte zu einer Entfestigung des Opalinustons bei Kontakt mit Wasser führen. Das in der Rampe und im Schacht zufließende Wasser

sollte oberhalb des Opalinustons vor Ort aufgefangen und abgepumpt werden, was streckenweise geschlossene Sammelleitungen erfordert.

- Der Einsatz einer Tunnelbohrmaschine zur Auffahrung der BE/HAA-Lagerstollen aus dem engen Bautunnel heraus bedarf in einigen Details (beispielsweise Freiflächen für Auf- und Abbau inkl. Nachläufer) noch weiterer Klärung. Auch bezüglich der Ausbruchssicherung der Lagerstollen ohne Einsatz von Spritzbeton bzw. Zement sieht die HSK weiteren Abklärungsbedarf.

Lüftungstechnische Aspekte

Lüftungstechnische Probleme werden für die Bauetappen 1 und 2 keine gesehen. Für die Bauetappe 3 hingegen ist eine Erhöhung der Luftmengen unumgänglich. Die zusätzliche Erwärmung infolge der Einlagerung der wärmeentwickelnden BE/HAA stellt in dieser Phase erhöhte Anforderungen an das Lüftungssystem; es sind zusätzliche Kühlmöglichkeiten in Erwägung zu ziehen. Eine unabhängige und rauchfreie Luftversorgung für Rettungsbombe und Zugangsbereich ist zusätzlich zu prüfen. Die aufgeführten Punkte betreffen nach Ansicht der HSK lösbare Probleme und stellen die grundsätzliche Machbarkeit nicht in Frage.

Temperaturentwicklung

Die Wärmeproduktion der BE/HAA und in geringem Ausmass der LMA verursacht eine Erwärmung der technischen Einbauten und des Gebirges. Diese Erwärmung breitet sich sowohl in den Schichten des Liegenden als auch horizontal im Wirtgestein und im Hangenden aus. Für die Abschätzung der Wärmeausbreitung und der daraus resultierenden Auswirkungen im Nah- und Fernfeld wurden vom HSK-Experten Emch+Berger zweidimensionale Modellrechnungen mit dem Programm Z-SOIL durchgeführt (Emch+Berger 2005).

Die Resultate zeigen, dass die thermische Phase mehrere hundert bis tausend Jahre dauert. Dabei erhöht sich die Temperatur im Opalinuston zusätzlich zum bereits herrschenden geothermischen Temperaturfeld um 20 bis maximal 50° C. Die mit der Erwärmung verbundene Ausdehnung des Gesteins führt zu einer mehrere km breiten, sehr flachen Aufwölbung des Gebirges bis zur Geländeoberfläche, die in der Grössenordnung von cm (Randbereich) bis dm (Zentrum der Aufwölbung) liegt. Die Abschätzungen haben ferner ergeben, dass für die prognostizierte vertikale Wärmeausbreitung von den regionalen Aquiferen oberhalb und unterhalb der Lagerebene (Malm- und Muschelkalkaquifer) keine nennenswerte Kühlwirkung angenommen werden kann.

Die thermisch induzierten Zusatzspannungen sind im Tiefenlager selbst am grössten und Deformationen können zu Schäden an den Innenschalen der Betriebs- und Bautunnel führen. Emch+Berger (2005) schätzen aufgrund überschlägiger Rechnungen ab, dass der vorgesehene Innenausbau seine Aufnahmekapazität für diese Zusatzbelastung infolge thermischer Verformung nach rund 50 Jahren erreicht haben wird. Schäden müssten bei einem längeren Offenhalten dieser Tunnel repariert werden. Die HSK empfiehlt, die Dimensionierung der Innenschalen im Falle der Realisierung des Lagers genauer abzuklären.

Die Berechnungen zeigen weiter, dass im Opalinuston mit keinen thermisch induzierten Zugspannungen zu rechnen ist. Damit ist auch nicht mit der Bildung von Rissen und neuen Wasserwegsamkeiten im Opalinuston zu rechnen.

Vergleich mit ausländischen Projekten

Aus dem Vergleich mit ausländischen Endlagerprojekten (u.a. Deutschland, Finnland, Schweden, Frankreich, USA) sind hinsichtlich des Layouts der Gesamtanlage Optimierungsansätze erkennbar. Hier ist beispielsweise aufzuführen, dass alternativ zum Zugangstunnel (Rampe) ein zweiter Schacht in Frage kommen könnte (Vorteil für die Bewetterung). Ein weiterer Ansatz besteht in der Überlegung, Schacht und Zugangstunnel auf verschiedenen Tiefenkoten miteinander zu verbinden, was für die Wasserhaltung und Lüftung Vorteile bringen könnte. Weiterhin könnte eine Neuordnung des Testlagers in einem separaten Bereich (beispielsweise in Form eines zusätzlichen Stollens) insofern von Vorteil sein, dass mögliche Beeinträchtigungen des wissenschaftlichen Messprogramms infolge der Bauaktivitäten ausgeschlossen werden können.

3.3 Betrieb des Lagers

Angaben der Nagra

Der Betrieb des geologischen Tiefenlagers wird in NTB 02-02, Kapitel 5, beschrieben, die Betriebssicherheit und der Strahlenschutz in Kapitel 6. Die Beschreibung des Betriebs umfasst insbesondere die betriebliche Auslegung, den Betriebsablauf, das Verkehrskonzept sowie die Dokumentation der Abfälle und die Qualitätssicherung.

Alle Abfälle sowie der Bentonit sollen per Schiene angeliefert werden, das Material für Verfüllung und Verschluss der Zugangsbauwerke (u.a. Zement, Sand, Kies) wird auf Lastwagen herantransportiert. Der Abtransport des Aushubs erfolgt ebenfalls über die Strasse. Ankomende Abfälle werden eingangs kontrolliert. Für die internen Transporte der Abfallgebinde gilt eine maximale Oberflächendosisleistung von 2 mSv/h. Für die BE- und die HAA-Behälter sowie für einen Gebindetyp der LMA (WA-COG-4 = Wiederaufarbeitungsabfälle Typ 4 der Cogéma) werden bis zur Einlagerung Transportabschirmungen verwendet. Alle anderen LMA-Gebinde werden zur internen Handhabung in Betoncontainer gestellt und mit Zement vergossen.

Der Einlagerungsbetrieb beginnt, wenn die Infrastruktur, das Pilotlager und die LMA-Lager-tunnel bereit sind. Der Zeitaufwand für die Beschickung der LMA-Lagertunnel und des Pilotlagers wird auf rund zwei Jahre geschätzt. Der Bau der ersten BE/HAA-Lagerstollen beginnt während der Einlagerungsphase der LMA. Während der gesamten Einlagerung der BE und HAA sind Bau und Betrieb räumlich voneinander getrennt: Die BE/HAA-Lagerstollen werden vom Bautunnel her aufgefahren, mit Ankern und Stahlnetzen gesichert und mit Schienen versehen; der fernbediente Einlagerungsbetrieb erfolgt hingegen von der Seite des Betriebstunnels (Fig. 3.2-2). Die BE/HAA-Lagerstollen werden erst kurz vor deren Verwendung aufgefahren und unmittelbar nach ihrem Errichten mit BE- oder HAA-Behälter beschickt. Dabei werden die BE- und HAA-Behälter entlang der Stollenachse mit Zwischenabständen von je 3 m auf Auflager aus kompaktierten Bentonitblöcken und Auflagerträgern aus Eisen positioniert. Der verbleibende Hohlraum des Lagerstollens wird anschliessend fernbedient mit Bentonitgranulat verfüllt. Unmittelbar nach der Verfüllung werden die Stollen versiegelt.

Die Einlagerung erfolgt nicht unter Zeitdruck und ist mit einer kleinen Betriebsmannschaft im einschichtigen Betrieb geplant. Die meisten Geräte werden vom zentralen Kommandoraum an der Oberfläche ferngesteuert, nur wenige Einheiten (Krane und Manipulatoren) sollen von lokalen Leitständen aus bedient werden. Arbeiten ohne signifikante Strahlenexposition erfolgen manuell vor Ort. Am Ende aller Einlagerungsarbeiten sind die Lagerstollen verfüllt und versiegelt, die Bau- und Betriebstunnel jedoch noch offen. Dieser Zustand kann über längere Zeit beibehalten werden. Die Überwachung des Pilotlagers wird bis zum Verschluss des Gesamtlagers fortgesetzt. Die Gesamtdauer des Einlagerungsbetriebs beträgt etwa 17 Jahre.

Die Transporte der Abfälle und der Verfüllmaterialien zum Tiefenlager erfolgen über die 12.5 % steile Zufahrtsrampe, entlang derer eine Zahnradbahn errichtet wird. Für die verschiedenen benötigten Lokomotiven kann auf bestehende Technologie zurückgegriffen werden. Die Rampe wird für die Abwärtstransporte auf 84 t, für Aufwärtstransporte auf 45 t (in Ausnahmefällen 60 t) ausgelegt.

Die Einlagerung der BE/HAA- und LMA-Behälter wird von der Nagra im Detail beschrieben: Für die BE/HAA-Behälter werden mehrere Transport- und Plattformwagen benötigt, die aber nur auf dem Niveau des Tiefenlagers in Betrieb sind. Nach dem Auffahren der ca. 6 % geneigten BE/HAA-Lagerstollen und deren Versiegelung am unteren Ende (gegen den Bautunnel) werden Bentonitsockel und BE/HAA-Behälter in regelmässigen Abständen positioniert. Nach jedem platzierten Behälter wird der entsprechende Stollenabschnitt mit Bentonitgranulat verfüllt. Versuche zum Einbringen von Bentonitgranulat wurden im Felslabor Mont Terri durchgeführt.

Die Einlagerung der LMA-Betoncontainer erfolgt fernbedient entlang der LMA-Lagertunnel. Die Betoncontainer werden mit einem Kran auf eine Entladebrücke gestellt und von dort auf ein Luftkissenfahrzeug umgeladen, das die Container im Lagertunnel positioniert. Je nach Containertyp erfolgt die Stapelung in zwei oder drei Lagen. Bei der Einlagerung der nicht vorgängig vergossenen WA-COG-4 werden zunächst die Stapelelemente vor Ort bereitgestellt und dann die Gebinde in Zweiergruppen angeliefert und einzeln in die Stapelelemente gestellt. Zur Abschirmung der Strahlung wird abschliessend ein Stapel mit mörtelgefüllten Betoncontainern eingelagert. Eine davor positionierte Trennwand dient der vollständigen Verfüllung des Lagertunnels mit Mörtel. Nach Abbruch der Installationen (mit Ausnahme der Zufuhrleitung des dünnflüssigen Mörtels) wird der Tunnelbereich verfüllt. Die Verfüllung erfolgt nach Bedarf in mehreren Schichten.

Die Nagra hat für die Betriebsphase des Lagers ein Verkehrskonzept erstellt, in das alle geplanten Bahn- und Lastwagentransporte eingeflossen sind, die zum Lager hinführen. Gemäss diesem Konzept ist während der Einlagerung in das Pilotlager und in die LMA-Lagertunnel wöchentlich mit 6 Eisenbahnwagen an Abfällen und 7 Lastwagen für Kiestransporte zu rechnen. Bei der Einlagerung der BE/HAA sind es etwa 9 Eisenbahnwagen und 1 Lastwagentransport pro Woche. Dazu kommt der Individualverkehr durch die Betriebsmannschaft. Die Nagra stuft das Verkehrsaufkommen als gering ein. Auf der Zugangsrampe sind nur wenige Transporte pro Tag zu erwarten, ein Kreuzen auf der Rampe ist nur in beschränktem Umfang erlaubt.

Die Nagra schätzt, dass das Lager von einer Mannschaft von ca. 30 Personen betrieben werden kann. Nicht zur Betriebsmannschaft gehören Personen, die die Bauarbeiten am Lager ausführen, sowie jene, die im Testlager oder mit der Überwachung des Pilotlagers beschäftigt sind. Für Besucher liegt ein entsprechendes Konzept vor.

Zur Betriebssicherheit und zum Strahlenschutz in der Anlage legt die Nagra eine qualitative Situationsanalyse vor, die sich vor allem auf Quervergleiche mit bestehenden Kernanlagen in der Schweiz stützt. Ziel der Gewährleistung der Betriebssicherheit ist die Vermeidung von Betriebsstörungen, Zwischenfällen und Unfällen und die Vermeidung unzulässiger Strahlenexposition innerhalb und ausserhalb der Anlage. Zur Umsetzung des Ziels sind sowohl die Anforderungen an die Abfälle zu definieren, technische und betriebliche Massnahmen zur Sicherheit und zum Strahlenschutz zu definieren und die Sicherheit in geeigneter Weise zu überwachen. Für den Normalbetrieb werden Betriebs- und Strahlenschutzkonzepte erstellt, gemäss denen die Anlagen technisch auszulegen sind und nach denen die Arbeit zu erfolgen hat. Massnahmen zum Strahlenschutz sind vergleichbar mit denjenigen heutiger Anlagen zur Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle (z.B. ZWILAG in Würenlingen).

In einem Störfallkatalog werden die wichtigsten Abweichungen vom Normalbetrieb aufgelistet und diskutiert und die Massnahmen zur Verhinderung solcher Störfälle bzw. zur Begrenzung der radiologischen Folgen aus solchen Störfällen dargelegt.

Zur Kontrolle und Langzeitüberwachung der Abfälle im Lager dienen das Pilotlager und der dazugehörige Kontrollstollen BE/HAA, sowie ein Kontrollstollen LMA, der den innersten der LMA-Lagertunnel überwacht. Bis zum endgültigen Verschluss des Lagers können hier umfangreiche Daten gesammelt werden, die als Beurteilungsgrundlage für den Entscheid zum Verschluss der Gesamtanlage dienen. Die Nagra schliesst eine Überwachung über den Lagerverschluss hinaus nicht aus. Die Beständigkeit und Funktionstüchtigkeit der Messsysteme soll über diese langen Zeiträume speziell geplant werden.

Die BE-Behälter, die spaltbares Material enthalten, müssen vor unerlaubtem Zugriff geschützt werden (IAEA Safeguard-Vorschriften). Die Komponenten einer solchen Überwachung bestehen zunächst in einer lückenlosen Kontrolle aller Zugänge und der Arbeitsschritte mit spaltbarem Material durch interne und externe Kräfte bis zum Verschluss des Lagers. Nach dem Lagerverschluss wird die Kontrolle durch Überwachung der Lagerumgebung von der Oberfläche aus fortgesetzt. Nach dem Verschluss des Lagers wird die Überwachung deutlich einfacher, da der Aufwand für einen illegalen Zugriff auf die spaltbaren Materialien massiv zunimmt.

Beurteilung der HSK

Die HSK beurteilt den Betrieb des Tiefenlagers aus Sicht des heutigen Standes der Technik als grundsätzlich machbar. Der Betrieb in den Übertageanlagen entspricht in vielen Aspekten dem Alltag in den heutigen Zwischenlageranlagen und unterliegt den in solchen Anlagen gängigen Strahlenschutzbestimmungen. Aus diesen Betrieben kann ein Grossteil der Erfahrungen und des Wissens übernommen werden.

Die von der Nagra diskutierten Konzepte zur Sicherheit, zum Strahlenschutz und zur Beherrschung von Störfällen während des Einlagerungsbetriebs sind dem heutigen Projektstand entsprechend aufgeführt. Diese Ausführungen sind nach Ansicht der HSK für den Machbarkeitsnachweis genügend. Für den Betrieb der ober- und unterirdischen Anlagen ergeben sich aus Sicht der HSK keine kritischen Sicherheitsaspekte. Da sich Bau- und Betriebsphase überlappen, erachtet es die HSK als wichtig, dass in einer nächsten Projektstufe die Analyse der möglichen untertägigen Gefährdungsereignisse und der zu treffenden Massnahmen noch verfeinert wird.

Die möglicherweise über lange Zeiträume erfolgende Datenerhebung während der Beobachtungsphase des Pilotlagers bedingt wichtige innovative Schritte im Hinblick auf langfristig stabile bzw. unterhaltbare Messsysteme. Solche Systeme und Datenerfassungen werden gegenwärtig in untertägigen Felslabors (z.B. Mont Terri) eingesetzt und erprobt.

Die Überwachung des spaltbaren Materials stellt in den Augen der HSK keine besonderen Anforderungen und kann gemäss den Vorschriften der IAEA (Safeguards) erfolgen. Die entsprechenden Überwachungsmechanismen werden bereits heute angewandt und die Einlagerung der Abfälle, die Versiegelung der Stollen und schliesslich der Lagerverschluss vermindern stufenweise das Risiko einer illegalen Entfernung spaltbaren Materials. Die Vorgaben einer nach Lagerverschluss weitergehenden Überwachung des Lagers bleiben noch zu entwickeln.

Für die Einlagerung der Abfälle mit höheren Anteilen an Nitrat (sog. LMA-2) ist ein separater Lagertunnel vorgesehen, der in direkter Fortsetzung des hinteren LMA-Betriebstunnels liegt (siehe Fig. 3.2-2). Damit liegt der hintere Abschnitt des Betriebstunnels LMA direkt im Strahlenfeld der im Lagertunnel LMA-2 eingelagerten Abfälle. Aus Gründen des Strahlenschutzes und der besseren radiologischen Überwachung der Abluft schlägt die HSK vor, den Lagertunnel LMA-2 gegenüber dem Betriebstunnel seitlich abzuwinkeln.

3.4 Rückholbarkeit der Abfälle

Gemäss dem neuen Kernenergiegesetz (Art. 37) muss bis zum Verschluss des Lagers eine Rückholung der Abfälle ohne grossen Aufwand möglich sein. Die Vorkehrungen zur Rückholbarkeit der Abfälle dürfen dabei die passiven Sicherheitsbarrieren nicht beeinträchtigen.

Angaben der Nagra

Die Rückholbarkeit der Abfälle wird in NTB 02-02, Kapitel 9, behandelt und steht in engem Zusammenhang mit Kapitel 8, dem Lagerverschluss. Die Rückholbarkeit wird nur für die BE-Behälter ausgeführt (ROWA 1999). Für die Rückholbarkeit der LMA wird auf das Projekt Wellenberg für schwach- und mittelaktiven Abfälle verwiesen (NTB 98-04).

Je später der Beschluss zum Rückholen der BE-Behälter fällt, desto mehr Siegelstrecken müssen destruktiv wieder entfernt werden und desto höher liegen die um die Behälter vorhandenen und von der Zerfallswärme der Abfälle produzierten Temperaturen. Für die Rückholung der BE-Behälter werden vor den Lagerstollen wieder die Schleusenbereiche freigelegt und mit verschiedenen Geräten die Stollenfüllungen entfernt und die Behälter mit fernbedienten Geräten herausgeholt. Die Nagra nimmt dabei an, dass die Rückholarbeiten vom Zeitbedarf her etwa den Einlagerungsarbeiten entsprechen.

Die Nagra kommt aufgrund ihrer Ausführungen zum Schluss, dass ihr Konzept den Qualitätsanforderungen und Forderungen der Richtlinie HSK-R-21 genügt und auch die Anforderungen der neuen Kernenergiegesetzgebung erfüllt.

Beurteilung der HSK

Die HSK beurteilt die Rückholung der BE-Behälter grundsätzlich als technisch machbar. Das skizzierte Konzept weist in den Augen der HSK einige offene Punkte auf, welche die Machbarkeit aber nicht in Frage stellen:

- Bei einer allfälligen Rückholung muss gewährleistet sein, dass die zurückgeholten Behälter an der Oberfläche unter Einhaltung der Strahlenschutzgesetzgebung sicher gehandhabt werden können. Es soll deshalb in Erwägung gezogen werden, die Übertageanlagen (Betriebsgebäude, Schleuse) bis zum definitiven Verschluss des Lagers betriebsstauglich zu halten.
- Je später die Rückholung der BE-Behälter erfolgt, desto höhere Temperaturen sind in den Lagerstollen zu erwarten. Berechnungen der Nagra (NTB 01-04) gehen von Temperaturen aus, die bereits nach wenigen Jahren an der Behälter-Bentonit-Grenze über 150°C und an der Bentonit-Opalinuston-Grenze bei 80°C liegen. In ROWA (1999) werden die Anforderungen bezüglich höherer Temperaturen für die verschiedenen Rückholmodule zwar erwähnt, die dort angenommenen Temperaturen sind jedoch seither nach oben korrigiert worden und die technischen Lösungen des Temperaturproblems werden nicht im Detail ausgeführt.
- Die Nagra geht in ihrem Rückholkonzept davon aus, dass die für den Einlagerungsbetrieb verlegten Schienen bei der Rückholung der BE-Behälter noch zur Verfügung stehen. Die starke Temperaturzunahme und die Konvergenz des Gebirges werden jedoch zu Verformungen an den Schienen führen, was deren Wiederverwendung in Frage stellen könnte. Hier besteht noch Abklärungsbedarf.
- Die Felssicherung der BE/HAA-Lagerstollen ist nur auf eine kurze Betriebszeit ausgelegt. Nach der Einlagerung der BE/HAA-Behälter und der Verfüllung mit Bentonitgranulat ist solange mit Konvergenzerscheinungen im Gebirge zu rechnen, bis sich ein Kräftegleichgewicht mit der Verfüllung eingestellt hat. Bei einer frühzeitigen Rückholung könnten teilweise reduzierte und instabile Tunnelquerschnitte vorliegen, wodurch ein fernbedientes Rückholen der Behälter ohne intensive Nachsicherung nicht möglich wäre. Die Nagra legt zu dieser Problematik Überlegungen zur Nachsicherung vor (ROWA 1999). Inwiefern bei solchen Verhältnissen die Arbeiten ausschliesslich fernbedient erfolgen können, bleibt abzuklären.

Die Detailausführungen zur Rückholung der Abfälle müssen, falls das Projekt weitergeführt wird, im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch noch genauer erarbeitet werden und dabei auch die verschiedenen möglichen Szenarien, die zum Entscheid eines Rückholens der Abfälle führen könnten, aufzeigen.

Auch aus einem gänzlich verschlossenen Tiefenlager könnten im Bedarfsfall die eingelagerten Abfälle zurückgeholt werden. Hierzu müssten allerdings die Zugangsbauwerke wieder geöffnet oder neu erstellt werden. Das ist aus heutiger Sicht machbar, aber aufwändig.

3.5 Überwachung und Verschluss des Lagers

Angaben der Nagra

Die Nagra hat das im Kernenergiegesetz vorgegebene Konzept der kontrollierten geologischen Tiefenlagerung umgesetzt. Das Konzept sieht nach Abschluss der Betriebsphase eine längere Beobachtungsphase vor, bevor schliesslich der vollständige Verschluss der Gesamtanlage erfolgt. Während der Einlagerung der Abfälle ist eine routinemässige Betriebsüberwachung wie in jeder Kernanlage vorgesehen. Bereits während dieser Phase sind kontinuierliche Überwachungsmessungen in der Anlage, insbesondere im Pilotlager wie

auch im weiteren Umfeld des Lagers geplant (z.B. Messung von hydrogeologischen, hydrochemischen und felsmechanischen Parametern), die das Verhalten des Lagersystems aufzeigen sollen.

Überwachung und Verschluss des Lagers werden in NTB 02-02 (Kap. 8) ausführlich dargestellt, wobei die Nagra folgende Schritte unterscheidet:

- Die LMA-Lagertunnel und das Pilotlager werden nach deren Beschickung mit Abfällen als erste verfüllt und versiegelt. Es beginnt die Überwachung des Pilotlagers, in welchem das Verhalten der Abfälle, der Verfüllung und des Wirtgesteins sowie ihre gegenseitige Wechselwirkung beobachtet werden.
- Darauf folgt die schrittweise Erweiterung des Lagers mit dem Bau der BE/HAA-Lagerstollen, der Einlagerung der BE/HAA-Behälter und der Verfüllung und Versiegelung dieser Lagerstollen. Da jährlich nur zwei BE/HAA-Lagerstollen gebaut und beschickt werden, erstrecken sich diese Arbeiten auf etwa 15 Jahre. Während dieser Zeit läuft auch die Überwachung des Pilotlagers.
- Am Ende der Einlagerung der BE/HAA-Behälter werden alle Lagerstollen verfüllt und versiegelt sein. Die Bau- und Betriebstunnel bleiben vorerst weiterhin offen.
- In einem weiteren Schritt werden der Betriebs- und der Bautunnel, der Lüftungstunnel sowie der Bauschacht verfüllt und an den Schlüsselstellen versiegelt. Nach dem Verschluss dieser Bereiche ist der Zugang zu den Kontrollstollen des Pilotlagers nur noch über den Zugangstunnel (Rampe) möglich.
- Nach einer längeren Phase der Beobachtung und Überwachung des Pilotlagers wird aufgrund einer aufdatierten Langzeitsicherheitsanalyse der Entscheid zum endgültigen Verschluss der Gesamtanlage getroffen. Der Verschluss erfolgt durch das Verfüllen aller noch verbleibenden Hohlräume und durch das Einbringen von Siegelementen an ausgewählten Schlüsselstellen des Lagersystems. Der Zugangstunnel (Rampe) wird bis zur Erdoberfläche zurückverfüllt. Die Aussenanlagen am Schachtkopf und im Portalbereich werden abgebaut und das Grundstück rekultiviert.

Die einzelnen Schritte des Verschlusses sind nach Abschätzung der Nagra jeweils innerhalb weniger Jahre realisierbar und können damit sowohl die Forderungen der Kernenergiegesetzgebung wie auch der Richtlinie HSK-R-21 erfüllen.

Mit dem Verschluss soll die Barrierenwirkung des durch den Bau verletzten Gebirgsbereiches wieder hergestellt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, hat die Nagra in den vergangenen Jahren verschiedene Materialien im Rahmen von Forschungsprogrammen untersucht und evaluiert. Als Versiegelungsmaterialien stehen kompaktierter Bentonit, Bentonitgranulat oder ein Gemisch aus Bentonit und Sand im Vordergrund. Die Wahl stützt sich auf internationale Erfahrungen ab, die im Rahmen von Experimenten in untertägigen Felslabors (Mont Terri, Grimsel, Stripa, Äspö, URL-Kanada) gewonnen wurden.

Das von der Nagra präsentierte Versiegelungskonzept konzentriert sich auf die hydraulisch massgebenden Schlüsselstellen des Lagers. Die Versiegelung besteht aus einem mehrschichtigen Versiegelungsbauwerk, welches sich aus einem Abdichtungselement und aus statischen Widerlagerelementen (Betonpfropfen, Bentonit-Sand-Gemische oder Schotterkies) zur Lastdruckaufnahme zusammensetzt. In NTB 02-02 werden je nach Position im Lagersystem vier verschiedene Typen von Versiegelungen aufgeführt. Die Länge des Ver-

siegelungsbauwerkes ist unterschiedlich und liegt zwischen 40 und 80 m. Im Bereich des Schachtsiegels wird die Betonauskleidung sowie die Auflockerungszone im umgebenden Fels entfernt, um den direkten Kontakt des Bentonits zum geringdurchlässigen Fels sicherzustellen. Für die Verfüllung der Bau- und Betriebstunnel ist das Einbringen eines Bentonit-Sand-Gemisches oder allenfalls von Opalinuston-Ausbruchmaterial vorgesehen.

Im Rahmen hydrodynamischer Modellrechnungen (NTB 02-03, NTB 02-06) hat die Nagra die Barrierenwirkung der Versiegelungsstrecken untersucht und anhand von Sensitivitätsanalysen den Einfluss erhöhter Durchlässigkeiten aufgezeigt. Die Studie zeigt, dass die gewählte Lagerauslegung mit den implementierten Versiegelungsstrecken eine wirksame hydraulische Entkopplung der Lagerbereiche BE/HAA und LMA gewährleistet. Bei Annahme erhöhter K-Werte für die Versiegelungsstrecken (5- bis 10-fach) erhöht sich der spezifische Wasserfluss am Übergang Wirtgestein/Wedelsandstein nur unwesentlich und übersteigt in keinem der Rechenfälle den Wert von $2 \cdot 10^{-13}$ m/s.

Beurteilung der HSK

Die Nagra hat in ihren technischen Berichten die wichtigsten Aspekte der Überwachung und des stufenweisen Verschlusses des geologischen Tiefenlagers dargelegt. Das Überwachungskonzept ist für die jetzige Phase des Machbarkeitsnachweises in groben Zügen skizziert. Das vorgelegte Konzept erfüllt die Anforderungen des Kernenergiegesetzes bzw. der Kernenergieverordnung.

Studien zur Überwachung und zum stufenweisen Verschluss eines geologischen Tiefenlagers wurden in neuester Zeit auch von internationalen Organisationen publiziert (IAEA 2001, EC 2004). Das Vorgehen der Nagra deckt sich weitgehend mit diesen international erarbeiteten Konzepten und Überlegungen.

Genaue Angaben zur Auslegung der Überwachungsmessungen, zu den Messparametern und zum Messprogramm selbst liegen noch nicht vor. Dieses Vorgehen ist korrekt, da nach den gesetzlichen Vorgaben die Details der Überwachung zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen der Bewilligungsschritte für ein Tiefenlager gemäss den Anforderungen der Behörden zu konkretisieren sind.

Aus Sicht der HSK gibt es keine Argumente, die die technischen Überwachungsmassnahmen heute grundsätzlich in Frage stellen. Bisherige Erfahrungen aus untertägigen Felslabors (u.a. Mont Terri, Grimsel, Mol, Äspö, URL) sowie internationale Studien der Europäischen Union (EC 2004) zeigen, dass ein breites Spektrum erprobter Messinstrumente zur Erfassung hydraulischer, hydrochemischer, felsmechanischer oder physikalischer Kennwerte vorliegen. Im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten sind die Langzeitbeständigkeit, die Zuverlässigkeit und die Wartungsmöglichkeiten der Instrumente noch genauer aufzuzeigen.

Die HSK erwartet, dass zwecks Beweissicherung bereits vor dem Bau eines geologischen Tiefenlagers der natürliche hydrogeologische und radiologische Zustand des Standortes im Rahmen eines Monitoringprogrammes während der Standortcharakterisierung erhoben wird (Nullmessung). Diese Messungen sollen während des Baus, des Betriebs und der schrittweisen Verfüllung des Tiefenlagers weitergeführt werden und Vergleichsmöglichkeiten für die spätere nachbetriebliche Überwachungsphase liefern.

Mit dem Verschluss des Tiefenlagers müssen alle unterirdischen Hohlräume verfüllt werden. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Versiegelung der Lagerbereiche im Opali-

nuston zu, um das Einschlussvermögen dieses Gesteinsbereiches sicherzustellen. Nach Ansicht der HSK ist das Verfüll- und Versiegelungskonzept der Nagra machbar und entspricht dem heutigen Stand der Technik. Erfahrungen aus Experimenten in verschiedenen Felslabors (Grimsel, Äspö, Stripa) zeigen, dass kompaktierter Bentonit die für die Versiegelung geforderte Barrierenwirkung erzielen kann.

Die Nagra sieht die Verwendung von Bentonitgranulat vor, das in seiner körnigen Form leichter eingebracht werden kann. Nach Ansicht der HSK besteht erst wenig Erfahrung mit diesem Material, insbesondere bezüglich Homogenität, Quell- und Langzeitverhalten. Zentral ist die Frage der technisch erreichbaren Dichte der Granulatfüllung, die massgebend die Eigenschaften der Bentonitbarriere beeinflusst. Experimente dazu sind zwar im Felslabor Mont Terri zurzeit im Gange, es liegen aber noch keine Abschlussergebnisse vor. Nach Ansicht der HSK sind die diesbezüglichen Forschungsarbeiten weiterzuführen und die Eigenschaften des Bentonitgranulates aufzuzeigen.

Bei einer Fortführung des Projekts ist eine Konkretisierung des Verfüll- und Versiegelungskonzeptes und eine Bestätigung der materialtechnischen Kennwerte im Rahmen der Bewilligungsschritte vorzulegen. Zu einem Versiegelungskonzept gehört nach Ansicht der HSK auch eine Darlegung möglicher Unzulänglichkeiten und Störfälle beim Einbau der Siegelstrecken und deren Konsequenzen auf die Langzeitsicherheit.

3.6 Beurteilung des Machbarkeitsnachweises

Nach Ansicht der HSK ist die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers unter den felsmechanischen Gegebenheiten im Opalinuston des Zürcher Weinlandes in der vorgeschlagenen Tiefenlage machbar. Für die Erstellung der Untertagebauwerke liegt heute eine breite Erfahrung aus dem Tunnel- und Bergbau vor. Die HSK sieht aber die nachfolgenden Aspekte betreffend Auslegung des Lagers und Vorgehensweise beim Bau, die eingehender abzuklären sind:

- Zur Erleichterung der Wasserhaltung und der Lüftung wäre es von Vorteil, den Zugangstunnel auf verschiedenen Tiefenlagen mit dem Lüftungs- und Bauschacht zu verbinden.
- Die Tunnel- und Schachtquerschnitte sind auf der Grundlage des benötigten Betriebslichtraumprofils, der Linienführung, der Bauverfahren und der zu erwartenden Konvergenz zu optimieren.
- Es besteht Abklärungsbedarf im Bauverfahren betreffend Zweckmässigkeit des Raisedrill-Verfahrens, Wasserhaltung, Einsatz einer Tunnelbohrmaschine und Ausbruchssicherung.
- Die Auslegung der Lüftung ist insbesondere für die dritte Bauetappe, wenn viel Wärme abzuführen ist, zu optimieren.
- Die Analyse der möglichen untertägigen Gefährdungsereignisse und der zu treffenden Massnahmen ist zu verfeinern.

Die aufgezeigten Abklärungen sind im Falle der Realisierung des Tiefenlagers vorzunehmen und können im Rahmen der nachfolgenden Planungsschritte bearbeitet werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt bedeuten sie keine grundsätzliche Einschränkung der Machbarkeit.

Das von der Nagra vorgelegte Konzept für Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss eines geologischen Tiefenlagers erfüllt nach Ansicht der HSK die gesetzlichen Anforderungen und Vorgaben, wie sie im neuen Kernenergiegesetz und in der zugehörigen Kernenergieverordnung festgehalten sind. Die genauen Arbeitsabläufe des Betriebs, die detaillierte Umsetzung der Überwachungsmassnahmen sowie die Ausführung der Verfüllarbeiten und des endgültigen Verschlusses des Lagers sind im Falle der Realisierung des Projekts im Verlaufe der späteren Bewilligungsverfahren weiter zu konkretisieren. Dabei sind insbesondere die Eigenschaften des Bentonitgranulats durch weitere Untersuchungsergebnisse zu erhärten.

Die Rückholung der eingelagerten Abfallbehälter ist nach Ansicht der HSK grundsätzlich machbar. Eine erleichterte Rückholbarkeit der Abfälle ist dahingehend sichergestellt, dass die Verfüllung und der Verschluss der Gesamtanlage einschliesslich der Zugangsbauwerke schrittweise erfolgt und sich über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten erstreckt. Bis zur letzten Verschlussstufe, der Verfüllung und Versiegelung der Rampe, ist die Zugänglichkeit zu den eingelagerten Abfällen gewährleistet. Im Falle der Realisierung des Projekts ist das Vorgehen zur Rückholung der Abfälle detaillierter zu erarbeiten.

Zusammenfassend kommt die HSK zum Schluss, dass der Machbarkeitsnachweis für das geologische Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlands für die angegebene Referenztiefe von etwa 650 m erbracht ist.

4 Sicherheitsnachweis

In diesem Kapitel wird der Sicherheitsnachweis als einer der drei Teilnachweise des Entsorgungsnachweises beurteilt. Nach einer Darstellung der Beurteilungsgrundlagen der HSK und einem Überblick über das Sicherheitskonzept der Nagra für das Tiefenlager wird die Methodik des Sicherheitsnachweises beurteilt. Es folgen Beurteilungen der wichtigsten Elemente des Tiefenlagers (Abfallinventar, technische und natürliche Barrieren) sowie des Mehrfachbarrierensystems als Ganzes. Schliesslich werden die Expositionspfade in der Biosphäre, die Szenarienanalyse sowie die Berechnung der radiologischen Auswirkungen beurteilt.

Die Sicherheit in der Betriebsphase des Tiefenlagers wird im Zusammenhang mit dem Entsorgungsnachweis nicht im Detail angesprochen. Die Betriebsvorgänge und die Sicherheit im Betrieb werden im Teilnachweis Bautechnische Machbarkeit behandelt und deshalb im Kapitel 3 des vorliegenden Gutachtens beurteilt.

4.1 Beurteilungsgrundlagen

Die Projektentwicklung zur Vorbereitung und Durchführung der Entsorgung radioaktiver Abfälle durch Tiefenlagerung ist ein langer und komplexer Prozess, der schrittweise durchgeführt wird. Die Schritte können z.B. an wichtige Projektentscheide oder an Bewilligungsstufen verknüpft sein. Bei jedem Schritt besteht die Gelegenheit zur Überprüfung der bisherigen Entwicklung und zur Anpassung des Projekts. Die Kernenergieverordnung verlangt bei jedem Bewilligungsschritt die Vorlage eines Sicherheitsberichts, der insbesondere den Nachweis der Langzeitsicherheit nach dem Verschluss des Lagers umfasst. Der Sicherheitsbericht muss jeweils die sicherheitsrelevanten Erkenntnisse aus den vorangehenden Projektschritten berücksichtigen. Der Entsorgungsnachweis ist kein Bewilligungsschritt, sondern geht einem solchen voraus. Das dem Entsorgungsnachweis zugrundegelegte Projekt ist nicht in jedem Detail festgelegt und muss nicht ausgeführt werden. Es ist ein Beispiel zur Darlegung der grundsätzlichen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers.

Bei der Beurteilung des Entsorgungsnachweises wird der Sicherheitsnachweis grundsätzlich an den gleichen Anforderungen gemessen wie der Nachweis der Langzeitsicherheit im Rahmen eines Bewilligungsverfahrens für ein Tiefenlager. Da es aber um die grundsätzliche Machbarkeit der Tiefenlagerung und nicht um ein auszuführendes Tiefenlagerprojekt geht, ist auch dann ein positives Urteil des Sicherheitsnachweises denkbar, wenn bezüglich der in den Unterlagen beschriebenen Detailausführungen noch offene Fragen bestehen oder wenn die Nachweise nicht bis ins letzte Detail geführt sind. Entscheidend ist die Gewissheit, dass mit allenfalls notwendigen Detailanpassungen (z.B. bezüglich Wandstärken der Behälter) der notwendige Sicherheitsbeitrag gegeben ist.

Die wesentlichen Anforderungen an die Langzeitsicherheit sind im Kernenergiegesetz, in der Kernenergieverordnung und in der Richtlinie HSK-R-21 festgehalten. Gemäss Kernenergiegesetzgebung muss das Tiefenlager insbesondere

- die dauernde Sicherheit durch gestaffelte passive Sicherheitsbarrieren gewährleisten,
- eine Beobachtungsphase unbestimmter Dauer vor dem endgültigen Verschluss zulassen,

- die Rückholung der eingelagerten Abfälle ohne grossen Aufwand bis zum Verschluss des Lagers ermöglichen,
- zusätzlich zum Hauptlager Testbereiche sowie ein Pilotlager umfassen.

Nach der Richtlinie HSK-R-21 sind folgende drei Schutzziele einzuhalten:

1. Die Freisetzung von Radionukliden aus dem verschlossenen Tiefenlager infolge realistischerweise anzunehmender Vorgänge und Ereignisse soll zu keiner Zeit zu jährlichen Individualdosen führen, die 0.1 mSv überschreiten.
2. Das aus dem verschlossenen Tiefenlager infolge unwahrscheinlicher, unter Schutzziel 1 nicht berücksichtigter Vorgänge und Ereignisse zu erwartende radiologische Todesfallrisiko für eine Einzelperson soll zu keiner Zeit ein Millionstel pro Jahr übersteigen.
3. Nach dem Verschluss des Tiefenlagers sollen keine weiteren Massnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit notwendig sein. Das Tiefenlager soll innert einiger Jahre verschlossen werden können.

Es werden zudem in der Richtlinie HSK-R-21 Anforderungen an das Sicherheitskonzept gestellt, die nicht quantifiziert sind:

- Es sollen verschiedenartige technische und natürliche passive (das heisst nicht von Überwachung und Instandhaltung abhängige) Barrieren vorgesehen werden, die gestaffelt zum Einschluss und zur Rückhaltung der Radionuklide beitragen (Mehrfachbarrierensystem).
- Die Vorkehrungen zur Überwachung des Tiefenlagers oder zur erleichterten Rückholung der Abfälle dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren nicht beeinträchtigen.
- Während der anfänglichen Phase („thermische“ Zeit von etwa 1000 Jahren) ist ein vollständiger Einschluss der Radionuklide im Tiefenlager anzustreben.
- Die radiologischen Auswirkungen aus dem Tiefenlager sind über die Anforderungen der Schutzziele hinaus zu reduzieren, soweit dies nach Stand von Wissenschaft und Technik möglich und zumutbar ist.

Schliesslich gibt die Richtlinie HSK-R-21 folgende Hinweise zur Durchführung des Sicherheitsnachweises:

- Die Ungewissheiten sind durch Untersuchung von Schwankungsbereichen der relevanten Parameter und Ergebnisse sowie durch die Verwendung konservativer (das heisst zur ungünstigen Seite neigender) Rechenannahmen zu berücksichtigen.
- Die Strahlendosis für die (unbekannte) Bevölkerung einer fernen Zukunft ist auf der Grundlage von Referenzannahmen für die Biosphäre (eine oder mehrere Referenzbiosphären) und der Annahme einer menschlichen Gesellschaft mit aus heutiger Sicht realistischen Lebensgewohnheiten zu berechnen.
- Die verwendeten numerischen Rechenmodelle sind zu qualifizieren (Verifikation und Validierung).
- Gewisse Vorgänge brauchen nicht betrachtet zu werden (z.B. absichtliche menschliche Eingriffe in das Lagersystem).

Als weitere Beurteilungsgrundlage dient der HSK der internationale Stand von Wissenschaft und Technik in Bezug auf die Methodik des Sicherheitsnachweises für ein Tiefenlager. Dieser Stand ist der HSK aus ihrer Mitarbeit in Gremien der IAEA und NEA sowie durch verschiedene bi- und multilaterale Projekte im Gebiet der Aufsicht über Endlagerprojekte bekannt. Die Bundesbehörden haben, zusätzlich zur Begutachtung der HSK, den Sicherheitsnachweis aus internationaler Sicht durch ein von der NEA zusammengestelltes Team von Experten verschiedener Länder beurteilen lassen (NEA 2004). In ihrer eigenen Beurteilung berücksichtigt die HSK auch die Befunde dieser internationalen Expertengruppe. Dies betrifft insbesondere folgende Aspekte:

- Grundzüge des Sicherheitskonzeptes und Vorgehen zum Nachweis der Sicherheit,
- Berücksichtigung des internationalen Standes der Kenntnisse über einzelne im Tiefenlagersystem ablaufende Prozesse,
- Berücksichtigung zusätzlicher Sicherheitsindikatoren,
- Qualitätssicherung von Daten, Modellen und Arbeitsschritten (z.B. Datenübergabe),
- Klarheit und Nachvollziehbarkeit der Dokumentation.

4.2 Sicherheitskonzept

Angaben der Nagra

Das Sicherheitskonzept für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle beruht auf dem Prinzip des Konzentrierens und Einschliessens (siehe Abschnitt 1.1), dem mit einem geologischen Tiefenlager entsprochen wird. Im Einklang mit den gesetzlichen Anforderungen wird die Sicherheit des Tiefenlagers durch passive Barrieren erreicht, die keinen Unterhalt und keine fortbestehende Kontrolle voraussetzen. Da mit passiven Barrieren ein absoluter Einschluss für alle Zeiten nicht möglich ist, legt die Nagra das oben genannte Prinzip folgendermassen aus:

Die radioaktiven Abfälle werden so gelagert, dass

- sie vom Lebensraum des Menschen fern gehalten sind („Isolation“),
- die Freisetzung radioaktiver Stoffe so lange verhindert wird, bis ihre Aktivität durch den radioaktiven Zerfall stark reduziert ist („Einschluss“),
- die restliche Freisetzung nicht zu Aktivitätskonzentrationen führen kann, die für Mensch und Umwelt schädlich sind („Begrenzung der Freisetzung“).

Im Tiefenlager sind mit dem Verschluss, das heisst nach Verfüllung und Versiegelung der Zugänge, die radioaktiven Abfälle vom Lebensraum des Menschen entfernt. Der möglichst lange Einschluss der Abfälle und die Begrenzung der restlichen Freisetzung werden mit einem robusten Barrierensystem erreicht. Gemäss der Nagra ist ein robustes System ein solches, bei dem keine offenen Fragen mehr bestehen, die die Sicherheit oder die Nachweismöglichkeit der Sicherheit ernsthaft gefährden und bei dem keine der Ungewissheiten, die bei der Sicherheitsbewertung berücksichtigt werden müssen, zu ausserordentlichen Anforderungen an die Standortcharakterisierung und die Forschung führen. Die Nagra bespricht im Sicherheitsbericht (NTB 02-05, Kap. 2), wie die Robustheit für das Tiefenlager erreicht wird. Unter anderem nennt sie

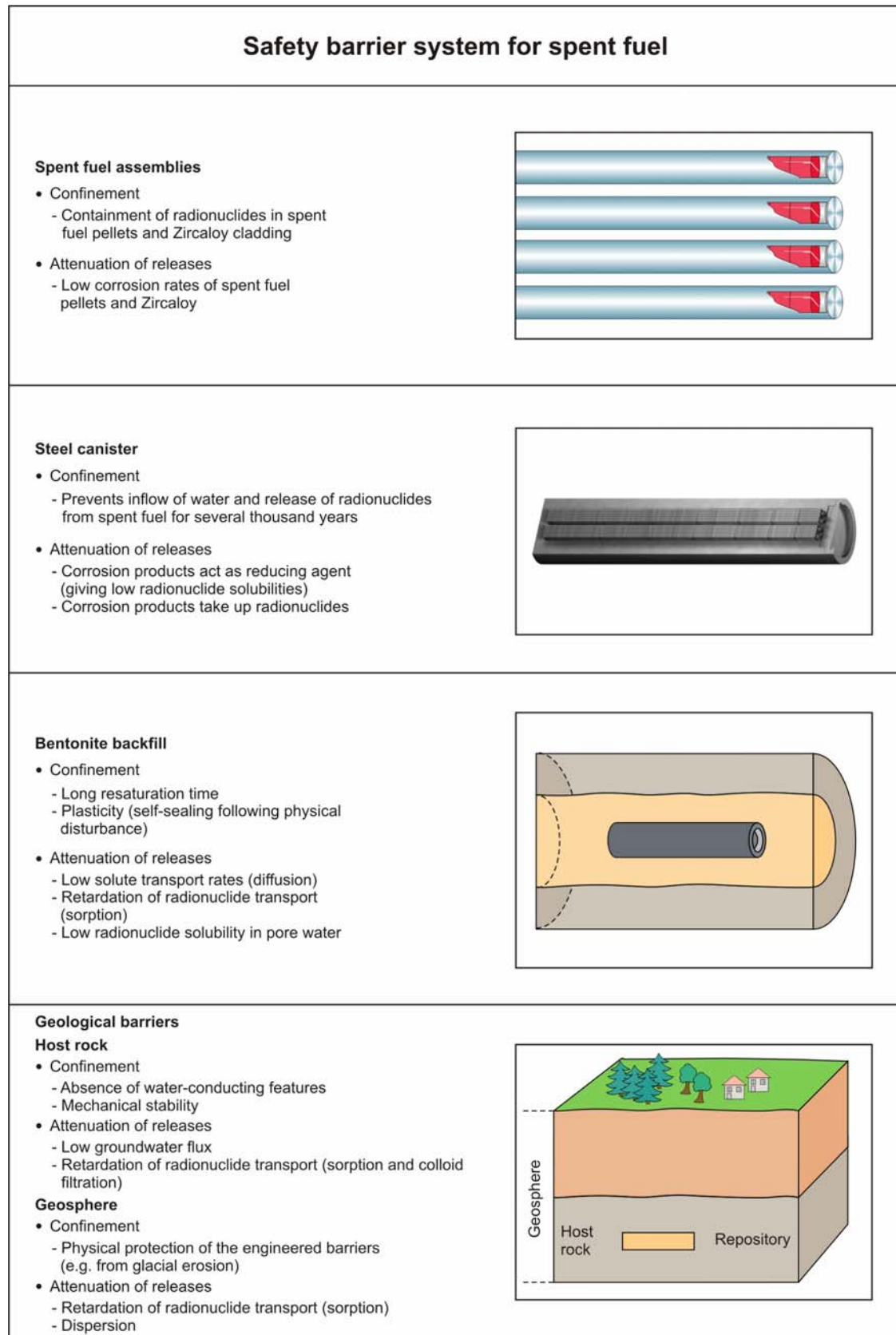
- die Verwendung mehrfacher passiver Barrieren,
- die tektonische Stabilität des Lagerstandortes,
- die Verwendung dauerhafter Materialien für die wichtigsten technischen Barrieren,
- die geringe Empfindlichkeit gegenüber Zersetzungsphänomenen der Abfälle und der Barrierenmaterialien,
- die räumliche Trennung der Abfälle innerhalb des Tiefenlagers sowie ihre Verfestigung als Schutz gegen die Folgen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Lager.

Das im Tiefenlager wirksame System der Barrieren verhindert und reduziert die Freisetzung von Radionukliden grundsätzlich auf zwei Arten: Es schützt die Abfälle und die inneren Barrieren gegen schädliche Einwirkungen von aussen, wodurch eine lange Isolationszeit erreicht wird, und es begrenzt und verzögert den Transport der Radionuklide nach aussen. Das Barrierensystem schliesst zumindest die folgenden Elemente ein:

Abgebrannte Brennelemente (BE)

Die Sicherheitsbarrieren bei der Lagerung abgebrannter Brennelemente sind in Figur 4.2-1 schematisch dargestellt.

- Der Brennstoff: Der grösste Teil der radioaktiven Stoffe bleibt im Brennstoff gebunden, solange der Endlagerbehälter dicht bleibt und somit kein Tiefengrundwasser zu den Brennelementen hinzutreten kann. Nach Zutritt von Wasser löst sich der Brennstoff nur sehr langsam auf. Der im Brennstoff gebundene Anteil der radioaktiven Stoffe wird entsprechend langsam in den Behälterinnenraum freigesetzt. Ein kleinerer Anteil der radioaktiven Stoffe ist jedoch im Brennstoff nicht oder weniger stark gebunden und wird nach Wasserzutritt schnell freigesetzt (IRF, instant release fraction).
- Die Hüllrohre: Die Brennstoffhüllrohre aus Zircaloy schliessen, solange sie intakt sind, den Brennstoff vollständig ein. Das Hüllrohrmaterial enthält selber auch radioaktive Bestandteile, die nach Versagen des Endlagerbehälters und Zutritt von Wasser mit der Korrosion des Hüllmaterials in das Behälterinnere freigesetzt werden. Auch hier gibt es einen Anteil von Radionukliden, die rascher freigesetzt werden.
- Der Endlagerbehälter: Der dickwandige Stahlbehälter schliesst die Brennelemente ein. Ein Versagen der Behälter mit anschliessendem Zutritt von Wasser zum Behälterinnenraum ist erst nach Tausenden von Jahren aufgrund einer Schwächung der Behälterwand durch Korrosion und durch den hohen Druck im Tiefenlager zu erwarten.
- Die chemischen Bedingungen im Wasser, das mit dem Behälter in Kontakt ist: Die chemisch reduzierenden, sauerstoffarmen Bedingungen in der Nähe des Behälters sowie das geringe Angebot an Sulfiden garantieren eine sehr tiefe Korrosionsrate des Eisens. Das bei der Korrosion entstehende Wasserstoffgas trägt mit dazu bei, die Auflösungsrate des Brennstoffs tief zu halten. Bei den reduzierenden Bedingungen sind die elementaren Löslichkeiten für viele der Radionuklide tief.



Figur 4.2-1: Sicherheitsbarrieren bei der Lagerung abgebrannter Brennelemente (aus NTB 02-05)

- Geringe Durchlässigkeit der Bentonitverfüllung: Der Bentonit, der den Endlagerbehälter umschliesst, verhindert durch seine geringe Durchlässigkeit eine Wasserströmung zum und vom Behälter. Die aus dem beschädigten Endlagerbehälter freigesetzten Radionuklide können die Bentonitverfüllung nur durch Diffusion durchqueren. Bei vielen Radionukliden sorgen die tiefen Löslichkeiten im Inneren der Bentonitbarriere dafür, dass die Diffusion nur durch ein geringes Konzentrationsgefälle getrieben wird.
- Plastizität der Bentonitverfüllung: Der Bentonit ist plastisch und schützt den Behälter vor allfälliger ungleichmässiger mechanischer Beanspruchung.
- Rückhaltung in der Bentonitverfüllung: Die Radionuklide reagieren mit den inneren Oberflächen des Bentonits (Sorption). Dadurch wird ihre Konzentration im Wasser herabgesetzt und ihre Diffusion durch die Bentonitbarriere verlangsamt.
- Geringe Durchlässigkeit des Opalinustons: Der Opalinuston ist ein sehr geringdurchlässiges Gestein. Dadurch ist der Beitrag einer möglichen Wasserströmung (Advektion) zum Freisetzungsvorgang durch den Opalinuston verhältnismässig gering. Durch die Begrenzung der Wasserströmung im Bereich der Oberfläche der Bentonitverfüllung wird auch die diffusive Freisetzung durch den Bentonit herabgesetzt.
- Rückhaltung im Opalinuston: Wie im Fall des Bentonits wird die Freisetzung sowohl beim Vorgang der Advektion wie demjenigen der Diffusion durch die Sorption der Radionuklide an den Porenoberflächen des Opalinustons verzögert.
- Weitere geologische Schichten: Die oberhalb und unterhalb des Opalinustons liegenden Schichten bewirken eine zusätzliche Verzögerung der Freisetzung der Radionuklide. Wenn die Radionuklide in Wasser führende Schichten gelangen, ergibt sich ausserdem eine Erniedrigung der Konzentration durch Verdünnung.
- Tiefenlage des Lagers: Die ca. 600 m mächtige Überdeckung des Opalinustons schützt das Wirtgestein und die technischen Barrieren vor den Vorgängen auf der Erdoberfläche, einschliesslich der Erosion.
- Versiegelungen: Die Freisetzung von Radionukliden entlang der Stollenwände und Zugänge wird durch spezielle Versiegelungsstrecken an den Enden der Einlagerungstollen sowie in den Zugängen zum Tiefenlager reduziert oder verhindert. Die Versiegelungsstrecken enthalten hoch verdichteten Bentonit, der einen abdichtenden Verschluss der Stollen und Zugänge bildet.

Verglaste hochaktive Abfälle (HAA)

Die Barrieren bei den verglasten hochaktiven Abfällen sind im Wesentlichen dieselben wie im Falle der abgebrannten Brennelemente. Anstelle des Brennstoffs und der Hüllrohre bestehen als analoge Barrieren die Glasmatrix, in der die Radionuklide eingebunden sind, und ein dünnwandiger Stahlbehälter, der die Glasmatrix enthält.

Langlebige mittelaktive Abfälle (LMA)

Die Sicherheitsbarrieren bei der Lagerung der LMA sind in Figur 4.2-2 schematisch dargestellt.

- Die Verfestigungsmatrix: Bei den meisten LMA-Sorten sind die radioaktiven Stoffe in einer Verfestigungsmatrix (meist Zement aber auch Bitumen) eingebunden. Die Ver-

festigungsmatrix verzögert die Freisetzung der Radionuklide, die erst nach Wasserzutritt stattfinden kann.

- Die Abfallverpackung: Die Verfestigungsmatrix ist meist in einem Stahlfass verpackt. Das Stahlfass gewährt einen Einschluss der radioaktiven Stoffe, bis die Korrosion den Wasserzutritt ermöglicht hat.
- Einlagerungscontainer: Die Abfallgebinde sind in Zementcontainern enthalten, in denen die Zwischenräume mit Zementmörtel gefüllt wurden.
- Verfüllung der Lagertunnel: Die Tunnelwände sind mit Spritzbeton verkleidet. Der durch die Abfälle nicht beanspruchte Raum im Lagertunnel ist mit Zementmörtel gefüllt.
- Chemische Bedingungen im Zement: Bei den stark alkalischen Bedingungen des Zementwassers ist die Löslichkeit einiger Radionuklide kleiner und es bleibt ein grösserer Anteil der Radionuklide an den inneren Porenoberflächen des Zements sorbiert, als bei neutralen oder sauren Bedingungen.
- Der Opalinuston, die weiteren geologischen Schichten und die Versiegelungen bilden wie bei den abgebrannten Brennelementen und den verglasten hochaktiven Abfällen die weiteren Barrieren.

Weitere Sicherheitselemente

Das Sicherheitskonzept umfasst ausser den aufgeführten Barrieren noch weitere Elemente. Die Nagra erwähnt hierzu die langfristige Aufbewahrung einer geeigneten Dokumentation über das Tiefenlager. Die Verfügbarkeit der Information trägt zum Schutz gegen unbeabsichtigtes menschliches Eindringen bei. Diesem Zweck dient auch, dass das Tiefenlager nicht in einer geologischen Umgebung errichtet wird, in der mit besonderen Bodenschätzen zu rechnen ist (siehe Abschnitt 2.6).

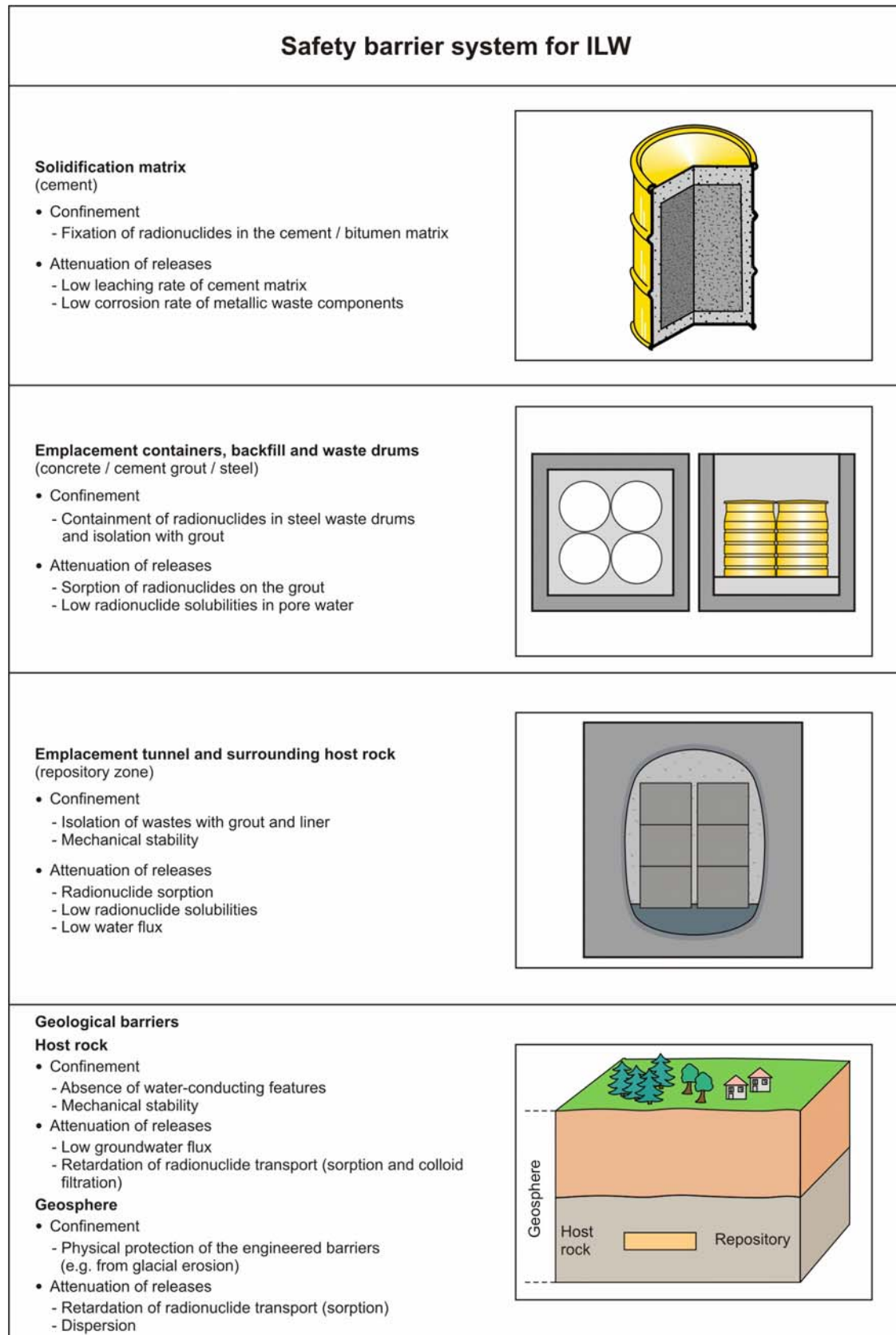
Pfeiler der Sicherheit

Die zur Gewährleistung der Sicherheit wichtigsten Eigenschaften und Barrieren werden von der Nagra hervorgehoben und als „Pfeiler der Sicherheit“ bezeichnet. Für alle Lagerteile gehören dazu

- die tiefe geologische Lage in tektonisch stabiler Umgebung,
- das geringdurchlässige Wirtgestein Opalinuston,
- die günstigen chemischen Bedingungen im Nahfeld und im Wirtgestein.

Für die abgebrannten Brennelemente und die verglasten hochaktiven Abfälle kommen hinzu

- die geringdurchlässige Bentonitverfüllung,
- der Endlagerbehälter,
- die Abfallmatrix.



Figur 4.2-2: Sicherheitsbarrieren bei der Lagerung langlebiger mittelaktiver Abfälle
(aus NTB 02-05)

Beurteilung der HSK

Das Sicherheitskonzept beruht auf der Isolation der Abfälle an einem Lagerort fern vom Lebensraum des Menschen. Die Barrieren und Sicherheitselemente wirken passiv und beruhen auf unterschiedlichen Wirkungsprinzipien. Damit sind bereits wesentliche Aspekte des in der Kernenergiegesetzgebung und in der Richtlinie HSK-R-21 geforderten Mehrfachbarrierensystems vorhanden. Die Fragen der Wirksamkeit und Langzeitbeständigkeit der einzelnen Barrieren werden in den Abschnitten 4.5 bis 4.7 beurteilt. Das Barriersystem als Ganzes, insbesondere die für ein Mehrfachbarriersystem wichtigen Eigenschaften wie Verträglichkeit und Redundanz der Barrieren, wird im Abschnitt 4.8 beurteilt.

Als zusätzliche Massnahme zur Vermeidung von unbeabsichtigten menschlichen Eingriffen in das Barriersystem, verlangt das Kernenergiegesetz in Art. 40, dass ein Schutzbereich um das Tiefenlager herum festgelegt und im Grundbuch eingetragen wird. Der Schutzbereich umfasst gemäss Kernenergieverordnung (Art. 70) das Tiefenlager mit seinen Zugängen sowie den einschlusswirksamen Gesteinsbereich (sowohl hydraulisch wie auch bezüglich der Nuklidfreisetzung).

Die starke Abnahme der Konzentration der Radionuklide, die durch Verdünnung beim Eintritt ins oberflächennahe Grundwasser stattfindet, wird allgemein nicht als Barrierenwirkung bezeichnet. Sie ist aber ebenfalls eines der Elemente, die dazu beitragen, dass die Konzentrationen allfällig freigesetzter Radionuklide und damit die Strahlenexposition herabgesetzt werden.

Im Sicherheitsnachweis werden nicht alle der hier genannten Barrieren in die quantitativen Nachweise einbezogen. Einige (z.B. Beiträge der Abfallverpackung der LMA, Rückhaltung von Radionukliden in oberen Erdschichten) bilden gewissermassen eine Reserve: Sie bieten zusätzliche Sicherheit über das nachgewiesene Mass hinaus.

Das Sicherheitskonzept entspricht dem international üblichen Standard. Zu diesem Schluss kommt auch die Expertengruppe der NEA (NEA 2004). Das Konzept ist im Sicherheitsbericht (NTB 02-05) in Form von Zielen und Prinzipien klar verständlich dargelegt.

Die Nagra schliesst in ihrer Definition der Systemrobustheit auch die Frage des benötigten Untersuchungsaufwands ein (NTB 02-05, Kap. 2.4.2: Das System ist robust, wenn unter anderem keine der sicherheitsrelevanten Ungewissheiten „voraussichtlich ausserordentliche Anforderungen an die Standortcharakterisierung und die Forschungstätigkeit stellen“). Der Forschungsbedarf leitet sich vom momentanen Wissensstand der beteiligten Menschen ab. Nach Ansicht der HSK sollte „Robustheit“ eine reine Systemeigenschaft bezeichnen, die nicht vom Stand des Wissens beim Erbauer des Tiefenlagers abhängig ist.

4.3 Methodik des Sicherheitsnachweises

Angaben der Nagra

Unter Sicherheitsnachweis („Safety Case“) versteht die Nagra eine „Reihe von Argumenten und Analysen, welche die Schlussfolgerung begründen, dass ein gegebenes Lagersystem sicher sein wird“ (NTB 02-05, Kap. 1). Er enthält insbesondere den Nachweis, dass die anwendbaren behördlichen Sicherheitskriterien erfüllt sind. Er enthält auch eine Darlegung der vorhandenen Ungewissheiten in den Annahmen und Analysen, die Evaluation ihres

Einflusses auf die Ergebnisse des Sicherheitsnachweises und die Beurteilung ihrer Bedeutung für das allfällige weitere Vorgehen im Hinblick auf die Realisierung eines Tiefenlagers.

Die Nagra beschreibt ihr Vorgehen beim Erarbeiten des Sicherheitsnachweises im Sicherheitsbericht (NTB 02-05) und im dazu gehörigen Modellier- und Datenbericht (NTB 02-06) sowie im begleitenden Bericht NTB 02-23 unter Bezugnahme auf zahlreiche weitere in diesen Unterlagen zitierte technische Berichte.

Die Methodik des Sicherheitsnachweises hat insbesondere die folgenden Zielsetzungen:

- Die gesamten verfügbaren wissenschaftlichen Kenntnisse über das Lagersystem und seine Umgebung sollen in die Erwägungen einfließen. Es sollen sich wo nötig Hinweise ergeben, wie diese Wissensbasis erweitert werden müsste.
- Das Vorgehen soll systematisch sein. Damit soll das Streben nach Vollständigkeit der betrachteten Möglichkeiten bezüglich der Eigenschaften und Entwicklung des Lagersystems unterstützt werden. Ungewissheiten sollen in angemessener Weise quantitativ dargelegt werden. Ein Überprüfungsverfahren und eine Qualitätskontrolle der Daten und Modelle sind Teile des Vorgehens.
- Der Nachweis der Sicherheit soll nicht auf die Erfüllung der behördlichen Kriterien alleine beschränkt sein, sondern weitere Sicherheitsindikatoren einbeziehen. Dabei soll auch eine Bewertung der möglicherweise nachteiligen Ungewissheiten sowie der Sicherheitsreserven aus bekannten, aber zur Erfüllung der Kriterien nicht berücksichtigten Eigenschaften oder Prozessen stattfinden.
- Eine Dokumentation soll erstellt werden, welche den Sicherheitsnachweis klar und nachvollziehbar beschreibt.

Ein wesentlicher Teil des Sicherheitsberichts (NTB 02-05) ist der Darstellung der wissenschaftlichen Kenntnisse zum Lagersystem und der Evaluation der damit verbundenen Kenntnislücken (Ungewissheiten) gewidmet. Die Evaluation der Kenntnislücken stützt sich auf die modellhafte Berechnung unterschiedlicher Alternativen der zeitlichen Entwicklung der Barrierenmaterialien oder anderer Prozesse, die für das Lagersystem relevant sind (NTB 02-06). Diese Untersuchungen begründen auch das Sicherheitskonzept, insbesondere die Abstützung auf die „Pfeiler der Sicherheit“ (siehe Abschnitt 4.2). Die Nagra hält fest, dass der heutige Stand der Kenntnisse ausreichend sei, um Wissenslücken ausschließen zu können, die den Sicherheitsnachweis in Frage stellen würden, auch wenn die wissenschaftlichen Grundlagen im Laufe der Realisierung eines Tiefenlagerprojekts ergänzt werden müssten (NTB 02-05, Kap. 8 und 9).

Die Übersicht über die wissenschaftlichen Grundlagen wird dadurch erleichtert, dass Informationen zu den Eigenschaften der einzelnen Bestandteile des Tiefenlagersystems sowie den darauf einwirkenden Prozessen und Ereignissen in einer Datenbank (FEP-Datenbank, „FEP“ steht für Features, Events and Processes) zusammengestellt wurden. Die Vollständigkeit der Datenbank wurde durch den Vergleich mit entsprechenden internationalen FEP-Datenbanken (z.B. NEA 2000, NEA 2003) geprüft.

Der Nachweis der Einhaltung der behördlichen Schutzziele (Richtlinie HSK-R-21) erfolgt mittels Berechnung der möglichen Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem Tiefenlager und der damit verbundenen Strahlenexposition des Menschen unter Berücksichtigung aller

Ungewissheiten. Die Freisetzungsberechnungen dienen auch als Grundlage für die Bewertung anhand weiterer Sicherheitsindikatoren, wie z.B. des Vergleichs der durch die Freisetzung entstehenden Radionuklidkonzentrationen und -flüsse mit natürlichen Radionuklidkonzentrationen und -flüssen.

Ungewissheiten, die für die Eigenschaften und die Entwicklung des Systems der Sicherheitsbarrieren des Tiefenlagers von Bedeutung sind, werden je nach ihrer Art unterschiedlich berücksichtigt (NTB 02-05, Kap. 3). Ungewissheiten, die vermieden oder reduziert werden könnten und deren Einfluss zuverlässig berechnet werden kann, werden durch den Vergleich von Berechnungen unter unterschiedlichen Annahmen untersucht. Fehlen Modelle oder Daten zur Berechnung, oder sind die Ungewissheiten grundsätzlich nicht reduzierbar, werden pessimistische oder konservative Annahmen bezüglich der ungewissen Eigenschaften getroffen, sodass in der weiteren Berechnung die mögliche Strahlenexposition nicht unterschätzt wird. „Pessimistisch“ nennt die Nagra Annahmen oder Parameterwerte, die zu besonders hohen, aber noch als möglich angesehenen radiologischen Auswirkungen führen, und „konservativ“ solche, die die radiologischen Auswirkungen überschätzen und nicht als möglich angesehen werden (NTB 02-05, Kap 3.7.3). Wenn die konservative Annahme im Nichtberücksichtigen eines FEP besteht, wird dieser FEP als Reserve-FEP bezeichnet. Ungewissheiten bezüglich der Verhältnisse auf der Erdoberfläche und insbesondere der Charakteristiken der Bevölkerung in ferner Zukunft sind sehr gross und kaum reduzierbar. Hier werden Berechnungen mit illustrativen Annahmen durchgeführt, gestützt auf die Eigenschaften der heutigen Gesellschaft und die als möglich erachteten zukünftigen klimatischen und geomorphologischen Entwicklungen.

Die zu untersuchenden Rechenfälle werden nach der folgenden Terminologie systematisiert:

- Als unterschiedliche Szenarien werden Fälle bezeichnet, die sich bezüglich des grundlegenden Freisetzungsvorgangs der Radionuklide unterscheiden (im Wasser gelöst, gasförmig, oder durch menschliches Eindringen).
- Als unterschiedliche Konzeptualisierungen werden Fälle bezeichnet, die zum gleichen Szenarium gehören, bei denen aber einzelne Prozesse oder Eigenschaften unterschiedlich modelliert werden.
- Als Parametervariationen gelten Rechenfälle der gleichen Konzeptualisierung eines Szenariums, die mit unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Datenwerte berechnet werden.

Als Referenzfall bezeichnet die Nagra das erwartete Szenarium (Referenzszenarium) mit Modellen (Referenzkonzeptualisierung) und Datensätzen (Referenzparameter), die auch grundsätzlich der Erwartung bezüglich der Prozesse und Eigenschaften entsprechen, wenn auch dabei bewusst gewisse pessimistische oder konservative Festlegungen getroffen wurden.

Die übrigen, alternativen Fälle illustrieren weitere Entwicklungsmöglichkeiten des Tiefenlagersystems. Sie ergeben sich aus:

- Ungewissheiten bezüglich Szenarien, Modellen oder Parameter.
- Der Betrachtung sogenannter „was wäre wenn“ Fälle („what if“ cases). So bezeichnet die Nagra Rechenfälle, die auf Annahmen beruhen, die nicht als wissenschaftlich begründet gelten, deren Betrachtung aber der Illustration der Robustheit des Systems dient.

- Unterschiedlichen Vorgaben bezüglich des Tiefenlagersystems (Varianten der Auslegung, z.B. unterschiedliche Inventare oder Behältermaterialien).
- Unterschiedlichen Annahmen zur Illustrierung der Folgen menschlicher Handlungen (z.B. Anbohren des Lagers) oder zukünftiger Klimazustände.

Bei der Ermittlung der radiologischen Auswirkungen der einzelnen Rechenfälle legt die Nagra ihr Hauptgewicht auf den Zeitraum bis zu einer Million Jahre. Sie führt Argumente dafür an, dass die Sicherheit des Tiefenlagers darüber hinaus zumindest für einige Millionen Jahre gewährleistet sei, und sie illustriert die mögliche weitere Entwicklung. Die besondere Bedeutung der ersten Million Jahre wird durch die sehr starke Abnahme der Aktivität des Lagerinventars und die Zunahme verschiedener Ungewissheiten in diesem Zeitraum begründet.

Beurteilung der HSK

Die Vorgehensweise der Nagra entspricht in den allgemeinen Zügen einer Methodik, die sich in vielen Ländern zur Untersuchung der Sicherheit von Tiefenlagern für radioaktive Abfälle bis anhin etabliert hat. Da Tiefenlagerprojekte auch international gesehen nicht sehr zahlreich sind, unterschiedlich weit fortgeschritten sind und unterschiedlichen behördlichen Anforderungen unterliegen, ist es nicht überraschend, dass die bei den verschiedenen Lagerprojekten angewendete Methodik im Detail Unterschiede aufweist. Bei jeder neuen Anwendung wird ein weiterer Entwicklungsschritt der Methodik vollzogen. Nach Ansicht des zur Beurteilung des Sicherheitsnachweises zugezogenen Expertenteams der NEA (NEA 2004, insbesondere Anhang 1) erfüllt der Sicherheitsnachweis der Nagra alle Anforderungen, die international an einen modernen Sicherheitsnachweis gestellt werden.

Die Aspekte der allgemeinen Kenntnisse, welche für die Sicherheit des Tiefenlagersystems Bedeutung haben können, werden in einer FEP-Datenbank beschrieben. Für die Sicherheitsanalyse zum Entsorgungsnachweis hat die Nagra eine auf die aktuellen Verhältnisse (z.B. geographische und geologische Situation) abgestimmte Datenbank (OPAFEP-Datenbank, NTB 02-23) geschaffen. Die Auswahl und Bewertung der FEPs ist nicht in jedem Detail zwangsläufig, sondern involviert auch subjektive Urteile von Fachexperten. Die Nagra hat versucht, auch in solchen Fällen eine möglichst grosse Objektivität dadurch zu erreichen, dass die Expertenmeinungen nach einem strukturierten Verfahren eingeholt wurden. Es wurde z.B. angestrebt, dass die einzelnen Experten auch die in ihrem Fachgebiet vorherrschende Meinung darlegten, falls sie von ihrer eigenen Ansicht abwich. Die Vorsicht bei den Expertenbefragungen, die Kontrollen durch Vergleich mit der internationalen NEA-FEP-Datenbank (NEA 2000, NEA 2003) sowie weitere interne und externe Prüfmassnahmen, die im Kapitel 3 und Appendix 4 von NTB 02-05 beschrieben sind, sind nach Ansicht der HSK geeignet, wesentlich zur Zuverlässigkeit und Glaubwürdigkeit der Datenbank als Beschreibung und Bereitstellung der für die Sicherheit relevanten wissenschaftlichen Grundlagen beizutragen.

Die Beurteilung der Datengrundlagen und die Durchführung der Sicherheitsanalyse sind Tätigkeiten, die nicht voneinander isoliert ausgeübt werden können. Die Datengrundlagen müssen für die Zwecke der Sicherheitsanalyse geeignet und ausreichend sein. Das stufenweise Vorgehen bei der Vorbereitung der geologischen Tiefenlagerung, wo die Sicherheitsanalyse unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse wiederholt und die Forschung gezielt auf Bedürfnisse der künftigen Aufdatierungen gerichtet werden kann, ist in dieser Hinsicht sehr

wichtig. Der notwendige Austausch von Informationen zwischen den beiden Tätigkeitsgebieten, Erarbeiten der Datengrundlagen einerseits und Durchführung der Sicherheitsanalyse andererseits, wird auch in kürzeren Zyklen oder spontan stattfinden. Ferner muss der Gefahr begegnet werden, dass die Erwartungshaltung in einem Tätigkeitsgebiet die Unvoreingenommenheit des Urteils im anderen Gebiet beeinträchtigt. Die Nagra hat diese Gefahr erkannt und begegnet ihr, indem sie die Tätigkeiten zur Bereitstellung der Wissensbasis einerseits und zur Entwicklung des Sicherheitsnachweises andererseits konzeptuell trennt und eine dritte Tätigkeit definiert, welche die Kontrolle der Unabhängigkeit und Unvoreingenommenheit der anderen beiden Tätigkeitsfelder umfasst (bias audit). Die Nagra definiert vier Gruppen: Führungsgruppe, Wissenschafts- und Technologiegruppe, Sicherheitsanalysegruppe und Auditgruppe. Die konzeptuelle Trennung ist aber, gemäss Angaben der Nagra, nicht vollständig als personelle Trennung gestaltet. Nach Ansicht der HSK ist die fehlende personelle Trennung eine gewisse Gefahr für das Funktionieren der beabsichtigten ideellen Trennung der Gruppen. Hingegen anerkennt die HSK die Bemühungen der Nagra um die wissenschaftliche Unvoreingenommenheit, die sich bei diesen Überlegungen zeigen. Der „bias audit“ ist ein wertvolles Element der Methodik, das bei der Nagra zum ersten Mal in dieser Art beschrieben wird. Ein weiteres wertvolles Element der Kontrolle in der Methodik der Nagra ist, dass die Grundannahmen der Sicherheitsanalysegruppe am Schluss ihrer Arbeit von der Wissenschafts- und Technologiegruppe nochmals aus deren Sicht geprüft werden.

Durch geeignete Kombinationen von FEPs lassen sich mögliche zukünftige Abläufe grob definieren (Szenarien), zunächst ohne auf die modellierbaren Einzelheiten der Prozesse einzugehen. Die Szenarienbildung und die anschliessende konzeptuelle Modellierung und Zuweisung von Rechenmodellen und Parameterwerten ist Gegenstand der Szenarienanalyse, die im Abschnitt 4.10 im Detail beurteilt wird. Die Berechnung der möglichen radiologischen Auswirkungen aus den Szenarien, Konzeptualisierungen und Rechenfällen wird im Abschnitt 4.11 beurteilt.

Die sorgfältige Analyse der Ungewissheiten bei der Szenarienbildung, der Modellierung und der Berechnung der radiologischen Konsequenzen ist wichtig, um eine zuverlässige Aussage über die Sicherheit zu erhalten. Die Nagra bedient sich anerkannter Verfahren (Konservativität, Parametervariationen, probabilistische Methoden), um die Bedeutung der Ungewissheiten zu charakterisieren und zu berücksichtigen.

Die Rechenmodelle, die von der Nagra eingesetzt wurden, sind in NTB 02-06 und in weiteren darin zitierten Berichten dokumentiert. Die Nagra weist nach, dass die Rechenmodelle auf ihre Richtigkeit geprüft und für das Anwendungsgebiet qualifiziert sind. Damit hat die Nagra eine entsprechende Anforderung der Richtlinie HSK-R-21 erfüllt. Die HSK hat sich ferner davon überzeugt, dass bei den Berechnungen und der damit verbundenen Datenhandhabung sowie bei der Dokumentation der Ausbreitungsberechnungen systematisch und kontrolliert vorgegangen wurde.

Ausser der Personendosis und dem Risiko aus unwahrscheinlichen Entwicklungen des Tiefenlagers (für die Bemessung anhand der Schutzziele der Richtlinie HSK-R-21) betrachtet die Nagra die folgenden weiteren Sicherheitsindikatoren:

- Radiotoxizität (radiologische Schädlichkeit bei der Aufnahme in den menschlichen Körper durch Ingestion) der Abfälle im Verlaufe der Zeit im Vergleich mit der Radiotoxizität natürlicher Stoffe.

- Freisetzung als Radiotoxizitätsfluss in der Umgebung, verglichen mit natürlichen Radiotoxizitätsflüssen.
- Konzentrationen von Radionukliden aus dem Tiefenlager in den oberen Randbereichen des Opalinustons, verglichen mit natürlichen Konzentrationen von Radionukliden.

Die Nagra illustriert auch die Einschlussfähigkeit des Tiefenlagers durch die Berechnung der zeitabhängigen Radiotoxizität der Radionuklide innerhalb der unterschiedlichen Barrieren des Tiefenlagersystems. Sie zeigt damit auf, dass (im Referenzfall) die überwiegende Mehrheit der Radionuklide bereits innerhalb der innersten Barrieren zerfällt.

Eine benutzerfreundliche und gleichzeitig der detaillierten Prüfung zugängliche Dokumentation einer Sicherheitsanalyse ist äusserst schwierig zu erreichen. Hervorzuheben ist die gute Beschreibung der Ziele, Grundlagen und der allgemeinen Methodik in NTB 02-05. Für die Nachprüfung ist die Aufteilung des Sicherheitsnachweises auf die zwei Berichte NTB 02-05 und NTB 02-06 erschwerend. Beispielsweise wird jeder Rechenfall zuerst in NTB 02-05 begründet und qualitativ beschrieben, detailliert und quantitativ aber ausschliesslich in NTB 02-06 dargelegt, wobei die Ergebnisse der Berechnungen wiederum nur in NTB 02-05 gezeigt werden. Während die deterministischen Berechnungen dennoch auf diese Weise nachvollziehbar sind, fällt die Beschreibung der probabilistischen Berechnungen zu knapp aus, um das Vorgehen der Nagra im Detail nachvollziehbar zu machen. Die Nagra zeigt die Ergebnisse der probabilistischen Berechnungen teilweise durch die Angabe der daraus resultierenden komplementären Verteilungsfunktion (CCDF) der Dosiswerte. Die Interpretation der Schutzziele der Richtlinie HSK-R-21 als eine Grenzkurve in diesen Darstellungen ist nach Ansicht der HSK nicht korrekt (siehe Abschnitt 4.11.5). Dieser Punkt ist im Zusammenhang mit dem hier beurteilten Entsorgungsnachweis nicht von Bedeutung, muss aber im Hinblick auf zukünftige Sicherheitsnachweise bereinigt werden.

Eine klare Definition der verwendeten Begriffe ist für die Verständlichkeit der Dokumentation wichtig. Es ist deshalb zu begrüßen, dass in NTB 02-05 eine Tabelle mit Begriffsdefinitionen vorhanden ist. Bei einem Vergleich mit dem Sicherheitsnachweis zum Projekt Kristallin-I der Nagra (NTB 93-22) fallen zweierlei Art Unterschiede auf. Erstens werden nun zusätzliche Begriffe eingeführt (Beispiele: „Pfeiler der Sicherheit“, „Super-FEP“), die dazu dienen, gewisse Schwerpunkte zu setzen, und die Bedeutung anderer Begriffe wird verlagert: Beispielsweise bedeutet „konservativ“ in Kristallin-I „pessimistisch aber möglich“ (NTB 93-22, Seite 22), nun aber „pessimistisch und unmöglich“ (NTB 02-05, Anhang 5). Zweitens ist auch eine Änderung in der Wahl des zentralen Referenzszenariums festzustellen: War es früher ein „konservatives“ Modell, das die Konsequenzen der erwarteten Entwicklung abdecken sollte (NTB 93-22, Seite 108), so beschreibt es jetzt die erwartete Entwicklung, obschon an einigen Stellen Konservativitäten zum Beispiel durch Modellvereinfachungen eingebaut werden (NTB 02-05, Seite 57).

Eine besondere Schwierigkeit ist mit dem Begriff „Szenarium“ verbunden. Im Allgemeinen wird damit eine (in groben Zügen charakterisierte) Variante des Zustandes und der zukünftigen Entwicklung des Tiefenlagersystems gemeint. Die von der Nagra gegebene Definition ist auch mit diesem Gebrauch des Wortes verträglich. In der Systematik der Rechenfälle verwendet die Nagra den Begriff aber in einem engeren Sinn, indem die unterschiedlichen Modellvorstellungen für die bei einem Szenarium wirksamen FEPs nicht zu neuen Szenarien führen, auch wenn unterschiedliche Varianten der zukünftigen Entwicklung des Tiefenlagersystems damit verbunden sein sollten. Die Nagra ist aber nicht alleine mit

dieser Schwierigkeit; in anderen Tiefenlagerprojekten ist beispielsweise die Verwendung des Begriffes zur Bezeichnung einer bloss durch die Angabe der FEPs (ohne Modellkonzepte) charakterisierten Entwicklung bekannt.

Die Behandlung der Ungewissheiten der Entwicklung der Erdoberfläche und der menschlichen Gesellschaft durch illustrative Rechenfälle, gestützt auf die als möglich angesehenen klimatischen und geomorphologischen Zustände sowie die heutigen Bevölkerungseigenschaften, ist im Einklang mit den behördlichen Anforderungen (Richtlinie HSK-R-21) und der internationalen Gepflogenheit (NEA 2004). Die Abstützung auf die Charakteristiken der heutigen Bevölkerung erlaubt einen Vergleich der Freisetzungen zu verschiedenen Zeiten mit einem einheitlichen Bewertungsmassstab. Die Schutzwirkung des Tiefenlagers, die durch den Einschluss und die Begrenzung der Freisetzung der Radionuklide erreicht wird, unterliegt somit zu unterschiedlichen Zeiten den gleichen Anforderungen, ohne Rücksicht darauf, ob z.B. die Nachkommen der heutigen Menschen nach mehreren hunderttausend Jahren Entwicklung noch dieselbe Strahlenempfindlichkeit aufweisen wie die Menschen heute.

Die Richtlinie HSK-R-21 beschränkt die Nachweisperiode für ihre Schutzziele nicht auf einen festen Zeitraum, wie z.B. eine Million Jahre. Eine solche Beschränkung würde eine befriedigende Antwort auf gewisse Fragen der Ethik voraussetzen, nämlich die Frage der gerechten Abwägung der Gefährdungen der Bevölkerungen unterschiedlicher Zeiten oder die verwandte Frage der Bedeutung der Nachhaltigkeit im Umgang mit der Umwelt, wenn lange Zeiträume betrachtet werden. Andererseits muss anerkannt werden, dass es mit Fortschreiten der Prognosezeit zunehmend schwieriger wird, die Bedeutung einer berechneten Dosis für das gesundheitliche Risiko zu bestimmen, auch wenn die heutige Bevölkerung als Massstab genommen wird. Das liegt insbesondere daran, dass die weit entfernte Zukunft mehr und mehr von seltenen (einmaligen) Ereignissen beeinflusst wird, deren Eintrittswahrscheinlichkeiten schlecht bekannt und Folgeerscheinungen wenig überblickbar sind. Aus diesem Grunde ist auch die Frage berechtigt, ob eine gleiche berechnete Schutzwirkung des Lagers zu frühen und zu späten Zeiten das gleiche Gewicht haben soll. In diesem Sinne akzeptiert die HSK vorerst die unterschiedliche Betonung der Nagra auf den Berechnungen der Dosisfolgen innerhalb der ersten Million Jahre und in der nachfolgenden Zeit. Die HSK stimmt auch mit der Nagra in der Aussage überein, dass während der ersten Jahrillion der radioaktive Inhalt der Abfälle durch den Zerfall auf eine mit natürlichen Uranerzvorkommen grob vergleichbare Radionuklidmischung (hauptsächlich die natürlichen Zerfallsketten) und –aktivität abklingt. Das heisst nicht, dass die Abfälle dann als harmlos oder als nicht radioaktiv anzusehen wären; es relativiert aber ihre Gefährlichkeit.

4.4 Abfallinventar

4.4.1 Abfälle im BE/HAA-Lager

Angaben der Nagra

Die im Rahmen des Entsorgungsnachweises im Referenzfall betrachteten Mengen an abgebrannten Brennelementen (BE) und verglasten hochaktiven Abfällen (HAA) berücksichtigen eine hypothetische Betriebsdauer von 60 Jahren aller bestehender Kernkraftwerke. Ein Teil der abgebrannten Brennelemente wird der Wiederaufarbeitung zugeführt. Die Wiederaufar-

beitung ist ein technischer Vorgang, mit dessen Hilfe U und Pu von den übrigen Bestandteilen der abgebrannten Brennelemente getrennt werden. Das abgetrennte Material wird in die Brennelement-Produktion zurückgeführt; beispielsweise Pu für die Herstellung von MOX-Brennelementen (MOX: mixed oxides, Gemisch aus U- und Pu-Oxiden). Es bestehen Verträge der schweizerischen Kernkraftwerksbetreiber mit den Firmen Cogéma (F) und BNFL (GB) für die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen im Umfang von $1195 t_{SM}$; die Einheit t_{SM} bezieht sich auf die Masse der Schwermetalle in den unbestrahlten Brennelementen. Es wird bei der Bestimmung des Abfallinventars davon ausgegangen, dass über die bestehenden Verträge hinaus keine weiteren abgebrannten Brennelemente wiederaufgearbeitet werden.

Abgebrannte Brennelemente

Die anfallende Menge der abgebrannten Brennelemente wurde im Referenzfall unter den Annahmen einer 60-jährigen Betriebsdauer der Kernkraftwerke und eines durchschnittlichen Abbrandes von $48 \text{ GWd}/t_{SM}$ berechnet. Obwohl es realistisch ist anzunehmen, dass im zukünftigen Reaktorbetrieb höhere durchschnittliche Abbrände erzielt werden, ist es für die Abschätzung der Abfallmengen konservativer, einen niedrigen Abbrand anzunehmen, da so die Anzahl der einzulagernden Brennelemente erhöht wird. Im Referenzfall wird mit der Einlagerung von $3072 t_{SM}$ UO_2 -Brennelementen und $145 t_{SM}$ MOX-BE gerechnet (NTB 01-01). Es wird vorausgesetzt, dass die Abfälle vor der Einlagerung während 40 Jahren (UO_2 -BE) bzw. 55 Jahren (MOX-BE) zwischengelagert werden.

Um die Anzahl der für den Entsorgungsnachweis zu modellierenden Beladungen der Lagerbehälter zu reduzieren, entschied sich die Nagra für eine kleine Anzahl von Beladungen, deren allgemeine Eigenschaften repräsentativ für die einzulagernden abgebrannten Brennelemente sind. Der Referenzfall umfasst drei Beladungen:

- Behälter mit einer Ladekapazität für neun UO_2 -Brennelemente aus Siedewasserreaktoren.
- Behälter mit einer Ladekapazität für vier UO_2 -Brennelemente aus Druckwasserreaktoren.
- Behälter mit einer Ladekapazität für drei UO_2 -Brennelemente und einem MOX-Brennelement aus Druckwasserreaktoren.

Die in der Sicherheitsanalyse verwendeten Nuklidinventare abgebrannter Brennelemente wurden von der Nagra mit einer erweiterten Version des Programms BOXER (Paratte et al. 1996) berechnet. Das Rechenprogramm BOXER hat gegenüber dem bis anhin von der Nagra verwendeten Programm ORIGEN2 (Croff 1983) den Vorteil, verlässlichere Inventare für Brennelemente mit höherem Abbrand - insbesondere die Nuklidinventare von MOX-Brennelementen mit Abbränden bis zu $65 \text{ GWd}/t_{SM}$ - zu liefern. Diese Resultate hat die Nagra mit Berechnungen unter Verwendung anderer Programme wie FISPIN (UKAEA 1995) und ORIGEN-S (Hermann und Westfall 1989) verglichen, um die Unsicherheiten der berechneten Nuklidinventare abschätzen zu können. Für die sicherheitsrelevanten Nuklide stellt man fest, dass die Resultate innerhalb von rund 10 % für die Spaltprodukte und 20 % für die wichtigsten U- und Pu-Isotope, wie auch für ^{241}Am und ^{244}Cm , die wichtigsten Isotope der höheren Actiniden, schwanken (NTB 01-01, S. 16).

Kritikalitätsbetrachtungen für abgebrannte Brennelemente

In abgebrannten Brennelementen verändert sich der Gehalt an spaltbaren Nukliden während der Lagerungszeit durch den radioaktiven Zerfall. Einige spaltbare Isotope wie ^{235}U werden durch den Zerfall schwererer Nuklide erzeugt. Die Nagra hat deshalb untersucht, ob auch unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung des Nuklidinventars die Möglichkeit einer nuklearen Kettenreaktion in den abgebrannten Brennelementen ausgeschlossen werden kann. Um Kritikalität zu erreichen, müssen in den Brennelementen eine genügende Menge an spaltbaren Nukliden, eine geeignete Anordnung der spaltbaren Materialien und Wasser zur Moderation der bei den Kernspaltungen entstehenden Neutronen vorhanden sein. Die wichtigsten in abgebrannten Brennelementen enthaltenen spaltbaren Isotope sind ^{235}U , ^{239}Pu und ^{241}Pu , welche anfänglich in ausreichender Menge vorhanden sind, um unter gewissen Voraussetzungen die Kritikalitätsbedingung zu erfüllen. Die Folgen einer Kritikalität wären um mehrere hundert Grad erhöhte Temperaturen im Nahfeld, welche die Lagerbehälter und die Verfüllmaterialien beschädigen und so die Rückhalteeigenschaften der technischen Barrieren verschlechtern könnten. Es ist deshalb wichtig zu zeigen, dass die gewählte Auslegung der Lagerbehälter und deren Beladung mit abgebrannten Brennelementen sicherstellen, dass eine Kritikalität während der Tiefenlagerung nie eintritt.

Berechnungen für MOX-Brennelemente mit Abbrand $33 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ und $55 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$, sowie UO_2 -Brennelemente mit Abbrand $40 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ und $55 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ zeigen, dass in den ersten Hunderten von Jahren die Reaktivität des Brennstoffes durch den Zerfall von spaltbarem ^{241}Pu und den Aufbau des daraus entstehenden ^{241}Am , eines starken Neutronenabsorbers, abnimmt (NTB 02-05, S. 125). Während der folgenden 10^5 Jahre steigt die Reaktivität wieder leicht an. Eine Analyse (Kühl et al. 2003) zeigt, dass keine Kritikalität eintreten kann, wenn die Lagerbehälter mit abgebrannten UO_2 -Brennelementen, die einen minimalen Abbrand von $15 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ aufweisen, beladen werden. Für Lagerbehälter mit einer gemischten Beladung mit MOX- und UO_2 -Brennelementen ist ein minimaler Abbrand der UO_2 -Brennelemente von $22 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ zur Verhinderung von Kritikalität notwendig. Weitergehende Betrachtungen, wie Änderungen in der Anordnung der spaltbaren Nuklide, beispielsweise durch Diffusion in die Bentonitverfüllung und Ausfällung im Porenraum des Bentonits, führen ebenfalls nicht zu kritischen Bedingungen. Ähnliche Schlussfolgerungen wurden auch aus Studien am Analog des natürlichen Reaktors in Oklo gezogen (Oversby 1996).

Verglaste hochaktive Abfälle

Die Nuklidinventare der verglasten hochaktiven Abfälle wurden mit dem Programm ORIGEN2 (Croft 1983) berechnet. Die Berechnungen basieren auf den jeweiligen Spezifikationen der Wiederaufarbeitungsfirmen. Im Referenzfall rechnet die Nagra mit 460 Kokillen verglaster Abfälle von Cogéma und 270 Kokillen von BNFL. Eine Kokille enthält rund 400 kg verglasten Abfall, insgesamt fallen also rund 300 Tonnen an.

Wärmeleistung

Im Referenzfall beträgt die Wärmeleistung eines mit abgebrannten UO_2 -Brennelementen beladenen Lagerbehälters nach 40 Jahren Zwischenlagerung rund 1500 W. Die α -Aktivität von abgebrannten MOX-Brennelementen mit einem Abbrand von $48 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ und einer Zwischenlagerungszeit von 40 Jahren ist rund fünf Mal grösser als jene von

UO₂-Brennelementen mit gleichem Abbrand und gleicher Zwischenlagerungszeit. Deshalb ist die durch α -Aktivität erzeugte Wärmeleistung von abgebrannten MOX-Brennelementen über längere Zeiten grösser als jene von abgebrannten UO₂-Brennelementen, während die jeweiligen Aktivitäten der Spaltprodukte vergleichbar sind (NTB 02-05, S. 97). Im Falle der Beladung eines Lagerbehälters mit drei UO₂- und einem MOX-Brennelement ist im Referenzfall eine Lagerzeit von 55 Jahren nötig, um sicherzustellen, dass eine maximale Wärmeleistung von 1500 W pro Behälter im Tiefenlager nicht überschritten wird.

Die Wärmeleistung einer Kokille verglasten Abfalls aus der BNFL-Produktion beträgt nach 40 Jahren Zwischenlagerung 690 W, jene einer Cogéma-Kokille 540 W. Die anfänglich pro Meter Stollen (siehe NTB 02-05, Figur 4.5-7) abgegebene Wärmeleistung beträgt rund 197 W für abgebrannte Brennelemente und 138 W für eine BNFL- bzw. 108 W für eine Cogéma-Kokille.

Sicherheitsrelevante Nuklide

Von den im Aktivitätsinventar für abgebrannte Brennelemente angegebenen 128 (74 für verglaste hochaktive Abfälle) Nukliden (siehe NTB 01-01, S. C-3) sind viele wegen geringer Aktivität oder kurzer Halbwertszeit für die Langzeitsicherheit nicht von Belang. Um die Anzahl der zu überprüfenden Nuklide auf die sicherheitsrelevanten zu beschränken und gleichzeitig den Aufwand für Nuklidausbreitungsrechnungen zu reduzieren, definiert die Nagra folgende Beurteilungskriterien:

- Nuklide, deren Dosisbeitrag bei einer vereinfachten Abschätzung eine Trinkwasserdosis von 10^{-5} mSv/Jahr unterschreitet, werden als nicht sicherheitsrelevant betrachtet. Diese vereinfachte Berechnung zur Auswahl der Nuklide geht von den Aktivitäten 1000 Jahre nach Einlagerung der Abfälle aus (NTB 02-06, S. E-1).
- Nuklide der Actiniden-Zerfallsketten werden als sicherheitsrelevant betrachtet, unabhängig davon, ob das oben erwähnte Kriterium der Trinkwasserdosis erfüllt ist. In den Berechnungen werden die Zerfallsketten mit ihren Verzweigungen berücksichtigt. Die Dosisfaktoren kurzlebiger Tochternuklide werden ihren jeweiligen Mutternukliden zugeordnet.
- Zusätzlich wurden ³H, ⁹⁰Sr und ¹³⁷Cs in die Liste der sicherheitsrelevanten Nuklide aufgenommen. Sie dienen als Indikatoren für Phänomene, die bei relativ frühen Zeiten nach der Einlagerung auftreten können, wie beispielsweise die Freisetzung von Nukliden aus Lochfrass beschädigten Endlagerbehältern (NTB 02-06, S. E-2).

Die Anzahl der als sicherheitsrelevant betrachteten Nuklide umfasst insgesamt 51 Nuklide (NTB 02-06, Tabellen A5-1 und A5-2).

Die radiologischen Eigenschaften eines Tiefenlagers sind primär durch das Inventar an radioaktiven Nukliden bestimmt. Für die Berechnung der Ausbreitung von Elementen, die die Löslichkeitslimite im Porenwasser erreichen können, muss auch das Inventar an stabilen Isotopen einbezogen werden. In NTB 02-06 führt die Nagra 12 solche Elemente (Ag, Ca, Ho, Nb, Ni, Pb, Pd, Se, Sm, Sn, Sr und Zr) für abgebrannte Brennelemente und 4 entsprechende Elemente (Ni, Pd, Se und Sn) für verglaste hochaktive Abfälle auf.

Beurteilung der HSK

Die HSK hat die Angaben der Nagra zu den voraussichtlich anfallenden Mengen an abgebrannten Brennelementen und verglasten hochaktiven Abfällen sowie mit einem eigenen Rechenprogramm die Angaben zur zeitlichen Entwicklung von Aktivität (α , β/γ) und Wärmeleistung geprüft (HSK 35/78, HSK 35/90). Die Resultate der Nagra sind nachvollziehbar. Gemäss den neuesten Angaben der schweizerischen Kernkraftwerksbetreiber (Swissnuclear, 2005) beläuft sich die gesamte Vertragsmenge mit den Wiederaufarbeitungsfirmen Cogéma und BNFL auf 1209 t_{SM}; der kleine Unterschied zur Angabe der Nagra (1195 t_{SM}) ist nicht signifikant.

Die Nagra stellt fest, dass keine Kritikalität in den eingelagerten abgebrannten Brennelementen entstehen kann, falls ihr Abbrand gewisse minimale Werte übersteigt. Die in Kühl et al. (2003) dokumentierten Kritikalitäts-Berechnungen der Nagra beruhen nach Ansicht der HSK auf konservativen Annahmen. Die HSK stimmt zu, dass Kritikalität nicht entstehen kann, falls der Abbrand der Brennelemente genügend gross ist. Eine von der schwedischen Aufsichtsbehörde SKI in Auftrag gegebene Studie (Hicks und Prescott 2000) kommt für das schwedische Tiefenlagerprojekt zu ähnlichen Schlüssen. Nach Ansicht der von der NEA beauftragten internationalen Expertengruppe besteht keine Dringlichkeit, die Frage der Kritikalität im Rahmen des Entsorgungsnachweises vertiefter zu untersuchen (NEA 2004, S. 72). Die HSK stimmt dieser Einschätzung zu.

Für allfällige weitere Projektschritte empfiehlt die HSK, die Abhängigkeit der Kritikalität vom Abbrand der eingelagerten Brennelemente, sowie von allfälligen Änderungen durch die Korrosion der Lagerbehälter und der eingelagerten Brennelemente detaillierter zu untersuchen. Der Einbezug des Brennelementabbrandes in den Sicherheitsbetrachtungen zur Kritikalität in Lagerbehältern hat zur Folge, dass bei einer späteren Realisierung eines Tiefenlagers der Abbrand der einzulagernden Brennelemente vor der Beladung der Lagerbehälter durch Kontrollmessungen verifiziert werden muss.

Das Kriterium zur Bestimmung der sicherheitsrelevanten Nuklide erachtet die HSK als zweckmässig. Die als Limite von der Nagra vorgesehene Trinkwasserdosis von 10⁻⁵ mSv/Jahr entspricht einem Zehntausendstel des in Schutzziel 1 der Richtlinie HSK-R-21 festgesetzten Wertes. Die Auswahl der sicherheitsrelevanten Nuklide für die weitere Berechnung der Nuklidfreisetzung wurde von der HSK mit eigenen Berechnungen überprüft und ist nach ihrer Beurteilung korrekt.

4.4.2 Abfälle im LMA-Lager

Angaben der Nagra

Bei der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen fällt eine Vielzahl von verschiedenartigen α -haltigen langlebigen mittelaktiven Abfällen (LMA) an. Die Abfälle enthalten Metalle, organische und anorganische Stoffe, die mit Zement oder Bitumen gemischt in Stahlfässer oder Zementbehälter abgefüllt werden. Im Modellinventar werden LMA in acht für die Abfalleigenschaften repräsentative Typen eingeteilt (NTB 01-01, S. 6). Die Nuklidinventare basieren auf Spezifikationen und zusätzlichen Informationen, die von BNFL und Cogéma zur Verfügung gestellt werden. Für zusätzliche LMA, die nicht aus den Wiederaufarbeitungsprozessen stammen, wurde nur das Gesamtvolumen abgeschätzt, da die Nuklidinven-

tare derartiger Abfälle im Vergleich zu jenen aus der Wiederaufarbeitung vernachlässigbar sind.

Die Abschätzung zukünftig anfallender LMA ist aus verschiedenen Gründen mit Unsicherheiten behaftet:

- Zusätzliche Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente: Der Abschluss neuer Verträge zur Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente würde notwendigerweise zu einem Anstieg der Menge der LMA führen.
- Reservevolumen: In der Auslegung des Tiefenlagers ist ein Reservevolumen für eventuell zusätzlich anfallende Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung sowie aus einer zukünftigen Konditionierungsanlage für abgebrannte Brennelemente vorgesehen. Die Nagra rechnet im Referenzfall mit einem Reservevolumen von 2900 m³ (NTB 01-01, S. 7).

Dem Referenzfall der Nagra liegen folgende Mengen an LMA zugrunde: 890 t Metalle, 2200 t anorganische Stoffe wie Salze, Gläser und rund 75 t organische Materialien (Bitumen, Plastik). Diese LMA werden in rund 1700 Abfallbehältern verschiedener Grössen eingelagert. Das totale Volumen der LMA einschliesslich des Reservevolumens beträgt im Referenzfall 7300 m³ (NTB 01-01, S. 8).

Wie für die hochaktiven Abfälle sind viele Nuklide der LMA wegen geringer Aktivität oder kurzer Halbwertszeit für die Langzeitsicherheit nicht von Belang. Als sicherheitsrelevant werden aufgrund analoger Kriterien wie für das BE/HAA-Lager 48 Nuklide eingestuft (NTB 02-06).

Wärme wird in den LMA-Lagertunneln durch die Zement-Hydratisierung und den radioaktiven Zerfall in den Abfällen erzeugt. Die Zerfallsleistung aller LMA zum Zeitpunkt der Einlagerung beträgt rund 1500 W verteilt über eine Tunnellänge von 240 m. Die Wärmeleistung des ganzen LMA-Lagers zum Zeitpunkt der Einlagerung entspricht also derjenigen eines mit abgebrannten Brennelementen beladenen Lagerbehälters. Die Abgabe der Hydratationswärme der Zementverfüllung erfolgt in den ersten Monaten nach dem Verschluss der LMA-Lagertunnel (NTB 02-05, S. 148). Die über einen längeren Zeitraum durch radioaktiven Zerfall produzierte Wärmeleistung ist zu klein, um die Eigenschaften der Abfallmatrix und der Zementverfüllung im Tiefenlager zu verändern. Nach Abschätzung der Nagra wird sich die Temperatur in den LMA-Lagertunneln durch die Hydratationswärme der Zementverfüllung und das Einbringen der LMA für einige Jahrzehnte um rund 12°C auf maximal 50°C erhöhen (NTB 02-05, S. 148).

Beurteilung der HSK

Die Überlegungen der Nagra zu den Nuklidinventaren und Volumina der konditionierten LMA beruhen zwangsläufig auf Annahmen, da LMA auch zukünftig anfallen werden und sich die Klassifikationskriterien für LMA möglicherweise ändern könnten. Die Angaben der Nagra zu den voraussichtlich anfallenden Mengen an LMA werden von der HSK als realistisch eingestuft.

Die Einteilung der LMA-Typen anhand von Spezifikationen der Wiederaufarbeitungsfirmen Cogéma und BNFL (NTB 01-01, S. 6) wie auch die Angaben zu den voraussichtlich anfallenden LMA-Typen erachtet die HSK als sinnvoll.

Das im Entsorgungsnachweis vorgesehene Reservevolumen von 2900 m³ für LMA ist nach Ansicht der HSK aufgrund der oben erwähnten Unsicherheiten ein gut begründeter, nötiger Teil der LMA-Lagerauslegung.

Die Angaben der Nagra zur Wärmeleistung der LMA zum Zeitpunkt der Einlagerung wurden mit einem HSK-eigenen Programm geprüft. Die Angaben zum erwarteten Temperaturanstieg in den LMA-Tunneln erscheinen der HSK plausibel. Die längerfristige Erhöhung der Temperatur in den LMA-Tunneln um rund 10°C hat nur einen begrenzten Einfluss auf die Umgebung der Lagertunnel.

Die Auswahl der sicherheitsrelevanten Nuklide für die weitere Berechnung der Nuklidfreisetzung ist nach Beurteilung der HSK korrekt.

4.5 Technische Barrieren im BE/HAA-Lager

4.5.1 Abfallmatrizen

Bei der Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente (BE) bestehen die innersten technischen Barrieren aus dem Brennstoff selber, den diesen umschliessenden Hüllrohren sowie den weiteren Strukturteilen der Brennelemente. Die Barrierenmaterialien sind zugleich selber Quellen für die Freisetzung radioaktiver Nuklide. Bei den verglasten hochaktiven Abfällen (HAA) bildet die Glasmatrix, in welcher die Radionuklide eingebunden sind, die innerste Barriere und ist gleichzeitig die Quelle für die Freisetzung.

4.5.1.1 Abgebrannte Brennelemente

Angaben der Nagra

Der in schweizerischen Kernkraftwerken verwendete nukleare Brennstoff liegt in der Form von keramischen Tabletten vor, die aus Urandioxid (UO₂) oder, im Fall von MOX-Brennelementen, aus einer Mischung von 5 - 6 % PuO₂ und 94 - 95 % UO₂ bestehen. Zwischen 300 und 400 dieser Brennstofftabletten von etwa 8 - 10 mm Durchmesser und 10 mm Länge sind in einem dicht verschweissten Hüllrohr aus Zircaloy, einer Zirkoniumlegierung, gestapelt eingeschlossen und bilden jeweils einen Brennstab. Die ca. 4 m langen Brennstäbe sind zu Brennelementen zusammengebaut, die je nach Typ etwa 60 (KKM) bis 205 (KKG) Brennstäbe enthalten. Das tragende Gerüst der Brennelemente (die Strukturteile) besteht aus Zircaloy, Inconel (Nickel-Chrom-Eisen-Legierung) oder Stahl.

Während des Reaktorbetriebs wird durch die Spaltung von Uran, Plutonium und anderen Actiniden in der Brennstoffmatrix (Brennstofftabletten), sowie durch Neutroneneinfang und radioaktiven Zerfall im Brennstoff und in anderen Komponenten des Brennelementes, eine grosse Anzahl von Radionukliden erzeugt. Der grösste Teil der Radionuklide ist innerhalb der einzelnen Körner der keramischen Brennstofftabletten gleichmässig verteilt. Die restlichen Radionuklide sind an den Korngrenzen angereichert, befinden sich in den Poren und Rissen der Tabletten, im Zwischenraum zwischen den Tabletten und dem Hüllrohr, sowie im oder auf dem Hüllrohrmaterial. Je nach ihrer Position können die Radionuklide im Tiefenlager nach Zutritt von Wasser zum Brennelement verhältnismässig rasch oder nur langsam ins Wasser freigesetzt werden.

Die Nagra geht auf die Eigenschaften der Brennelemente im Sicherheitsbericht (NTB 02-05 und NTB 02-06) sowie insbesondere in den dort zitierten Berichten NTB 02-07 und NTB 00-04 ein.

Aktivitätsinventar

Einige der Radionuklide, wie ^{14}C und ^{36}Cl , sind sowohl in den Brennstofftablets wie auch in der Zircaloy-Hülle vorhanden. Andere, wie die Actiniden, sind hauptsächlich in den Brennstofftablets enthalten. Einige Nuklide, beispielsweise ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{93}Mo oder ^{94}Nb , befinden sich vornehmlich in den Brennstabhüllen und den Strukturteilen.

Beim radioaktiven Inventar des Brennstoffs unterscheidet die Nagra zwei Anteile: den verhältnismässig rasch freisetzbaren Anteil, der in Hohlräumen, an Korngrenzen und in Randbereichen des Brennstoff-Festkörpers vorhanden ist (IRF, *instant release fraction*), und den erst mit der langsamen Auflösung des Brennstoffs freisetzbaren Anteil der in der Brennstoffmatrix gleichmässig verteilten Radionuklide.

Das radioaktive Inventar der Hüllrohre besteht ebenfalls aus zwei Anteilen: einem Anteil, der in der oberflächlichen Zirkoniumoxidschicht vorhanden ist und rasch freigesetzt wird (IRF), und einem Anteil, der im Zircaloy gleichmässig verteilt ist und anteilmässig mit der fortschreitenden Korrosion des Zircaloys freigesetzt wird.

Die Nagra gibt für ihren Referenzbrennstoff (siehe Abschnitt 4.4) die Aufteilung des Inventars gemäss der obigen Schilderung an (NTB 02-06). Sie gibt die Korrosionsraten von Zircaloy und von Inconel an und diskutiert zwei mögliche Modelle für die Vorgänge, die zur langsamen Auflösung der Brennstoffmatrix im Wasser führen. Die Begründungen der Nagra für diese Angaben sind in NTB 02-07, NTB 00-04 und den darin zitierten Berichten zu finden.

Die instant release fraction IRF

Die Freisetzung von Radionukliden beginnt erst nach dem Versagen der Endlagerbehälter, im Referenzfall nach 10'000 Jahren, und nach Zutritt von Wasser zu den Brennelementen. Die rasche Freisetzung der IRF aus dem Brennstoff und den Hüllrohren liefert den massgeblichen Beitrag zu den in die Biosphäre gelangenden radioaktiven Stoffen und zur maximal erwarteten Dosis während der ersten Million von Jahren.

Die für den Referenzfall (Abbrand $48 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$) verwendeten IRF sind in Tabelle 4.5-1 angegeben. Die in Parametervariationen für höhere Abbrände benützten IRF sind detaillierter in NTB 02-06, Tabelle A3.4-2b, angegeben. Die Nagra führt für den Sicherheitsnachweis sowohl deterministische wie auch probabilistische Berechnungen der Freisetzung durch. Für die probabilistischen Berechnungen wird eine logarithmische Gleichverteilung der IRF zwischen den Werten für die Abbrände $48 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ und $75 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ eines Druckwasserreaktor-Brennelementes angenommen.

Nuklid	SWR UO ₂ (48 GWd/t _{SM}) [%]	DWR UO ₂ (48 GWd/t _{SM}) [%]	DWR UO ₂ (75 GWd/t _{SM}) [%]	DWR MOX (48 GWd/t _{SM}) [%]
³ H	2	2	2	2
¹⁰ Be	10	10	10	10
¹⁴ C _{inorg}	10	10	10	10
¹⁴ C _{org}	20	20	20	20
³⁶ Cl	13	10	25	15
⁷⁹ Se	9	4	25	15
⁹⁰ Sr	1	1	1	1
⁹⁹ Tc	2	2	17	2
¹⁰⁷ Pd	2	2	17	2
¹²⁶ Sn	9	4	25	10
¹²⁹ I	9	4	25	10
¹³⁴ Cs	5	4	25	10
¹³⁷ Cs	5	4	25	10

Tabelle 4.5-1: Annahmen der Nagra zur instant release fraction (IRF) (gemäss NTB 02-06).
Der Referenzfall der Nagra bezieht sich auf einen Abbrand von 48 GWd/t_{SM}.
Die Prozentangaben beziehen sich auf die im Brennstoff (bzw. in den Hüllrohren für ¹⁴C_{org}) enthaltene Menge des Nuklids.
SWR: Siedwasserreaktor, DWR: Druckwasserreaktor, SM: Schwermetall.

Auflösung der Brennstoffmatrix

Zur Zeit des Behälterversagens ist der anfänglich im Tiefenlager vorhandene freie Sauerstoff durch Korrosion und andere Prozesse aufgebraucht und es herrschen reduzierende Bedingungen. Die β - und γ -Aktivität des Brennstoffs hat zu dieser Zeit stark abgenommen. Aufgrund der geringen Löslichkeit von Uran bei reduzierenden Bedingungen und des geringen Wasseraustausches im Tiefenlager ist die Auflösung der Brennstoffmatrix ein sehr langsamer Vorgang.

Die Auflösung kann aber durch lokal veränderte Redox-Bedingungen aufgrund der α -Radiolyse vom Wasser beschleunigt werden. Eine Abschätzung (NTB 00-04, S. 9) zeigt, dass ein Anteil von 0.4 % der α -Zerfälle im Brennelement eine Radiolyse des Wassers bewirken kann; es sind die Zerfälle, die im Brennstoff weniger als etwa 10 μ m von den vom Wasser benetzten (äusseren und inneren) Oberflächen stattfinden. Die Energie der restlichen Zerfälle wird im Brennelement selbst absorbiert. Durch die Radiolyse wird insbesondere H₂O₂ und H₂ erzeugt. Das H₂O₂ oxidiert das U(IV) der Brennstoffmatrix zum leichter

löslichen U(VI). Reaktionen mit im Wasser gelöstem Fe(II), das aus dem Korrosionsprodukt Magnetit (Fe_3O_4) der Lagerbehälter stammt, sowie mit dem aus der Radiolyse und der Behälterkorrosion entstehenden H_2 , reduzieren aber die Verfügbarkeit des H_2O_2 für die Brennstoffauflösung.

Die Nagra betrachtet zwei eingrenzende Modelle für den Auflösungsprozess der Brennstoffmatrix. Im einen Modell nimmt sie an, die Löslichkeitslimite des U(IV) werde erreicht und der weitere Auflösungsprozess dadurch gehemmt. Mittels Diffusion des gelösten Urans durch die Bentonitbarriere wird U(IV) aus dem Nahfeld entfernt und durch weitere Auflösung der Brennstoffmatrix nachgeliefert. Die effektive Auflösungsrate der Brennstoffmatrix wird deshalb in diesem Modell durch die Diffusionsrate des Urans in der Bentonitverfüllung bestimmt. Im anderen Modell wird die Lösungsmitte von Uran nicht beansprucht, sondern es wird angenommen, dass die Auflösung der Brennstoffmatrix allein durch die Oxidation von U(IV) zu U(VI) verursacht wird. Die Auflösungsrate wird dabei durch die Rate der Radiolyse bestimmt, die ihrerseits von der mit der Zeit abnehmenden α -Aktivität des Brennstoffs abhängt. Dieses zweite Modell führt zu einer rascheren Auflösung der Brennstoffmatrix als das erste. Es wurde von der Nagra pessimistischerweise für den Referenzfall angenommen.

Auch im zweiten Modell ist die Matrix des abgebrannten Brennstoffs unter den im Tiefenlager vorherrschenden reduzierenden Bedingungen und dem geringen Wasseraustausch eine äußerst stabile Abfallform. Berechnungen der Nagra zeigen, dass über einen Zeitraum von einer Million Jahren im Referenzfall nur 4.5 % des in der Brennstoffmatrix enthaltenen Nuklidinventars freigesetzt werden (NTB 02-05, Fig. 6.7-5). Ein weiterer Hinweis kommt von Studien an natürlichem Uraninit (metallischem UO_2), die zeigen, dass das Mineral gegenüber direkten Strahlenschäden in hohem Masse widerstandsfähig ist. Obwohl die Matrix der abgebrannten Brennelemente eine hohe Strahlendosis im Laufe der Hunderttausende von Jahren absorbieren muss, wird nicht davon ausgegangen (Weber 1981), dass die Matrix dadurch ihre strukturellen Eigenschaften ändert.

Versagen der Hüllrohre

Bei Kontakt mit Wasser oder Wasserdampf bildet sich auf der Zircaloyoberfläche eine schützende Oxidschicht, die zu einer nur geringen Korrosionsrate von weniger als $0.01 \mu\text{m/a}$ führt. Die Zersetzung der Zircaloy-Brennstoffhüllen mit dieser sehr kleinen Korrosionsrate setzt Aktivierungsprodukte wie ^{14}C und ^{36}Cl frei.

Nach Ansicht der Nagra wird ein Versagen der Hüllrohre eher durch lokale Korrosion oder aufgrund einer durch ins Zircaloy aufgenommenes H_2 erzeugten Rissbildung als durch die gleichmässige Korrosion erfolgen. Da die Empfindlichkeit von Zircaloy auf lokale Korrosion in pH-neutralem Grundwasser wie auch die Aufnahme von H_2 in Zircaloy bei hohen H_2 -Partialdrücken nicht gut bekannt sind, geht die Nagra konservativerweise davon aus, dass die Zircaloyhülle die Nuklidenausbreitung nicht verzögert (NTB 00-04). Die angesprochene Versagensart begünstigt aber die Ausbildung einer Umgebung im Inneren des defekten Brennstabs, in welcher der Brennstoff infolge der Radiolyse des Wassers oxidiert wird. Dadurch wird die Auflösung der Brennstoffmatrix beschleunigt.

Experimente haben gezeigt, dass in die Oxidschicht auf der Zircaloyoberfläche ^{14}C eingelagert wird. Dieses ^{14}C wird, als schnell löslich, der IRF zugerechnet. Da auch experimentelle Hinweise bestehen, dass das ^{14}C der Oxidschicht in organischer Form vorliegen könnte, trifft die Nagra für die Freisetzungsberechnungen konservativerweise diese Annahme.

Beurteilung der HSK

Zusammengefasst sind fünf Quellen der Freisetzung zu unterscheiden, die nachfolgend einzeln besprochen werden:

- Brennstoff: Hohlräume, Korngrenzen und Randbereiche der Brennstofftabletten (IRF)
- Brennstoff: Brennstoffmatrix allgemein
- Hüllrohre: Oxidschicht (IRF)
- Hüllrohre: Metall
- Strukturteile

IRF aus dem Brennstoff

Der Brennstoff ist nach der Bestrahlung porös und zerklüftet. Es ist aus Beobachtungen an bestrahlten Brennstäben bekannt, dass gewisse Radionuklide während des Reaktorbetriebs an die Korngrenzen des Brennstoffs und in vorhandene Hohlräume im Brennstoff hinein diffundieren. Die in den Hohlräumen vorhandenen Radionuklide können nach Wasserzutritt sofort freigesetzt werden. Die an den Korngrenzen gelagerten Radionuklide werden zwar langsamer freigesetzt aber, gemäss Nagra, noch auf einer für die Freisetzungsdauer aus dem Endlager kurzen Zeitskala (in NTB 02-07 werden Hunderte bis Tausende von Jahren genannt), sodass beide Beiträge zu einer IRF zusammengefasst werden. Konservativerweise geht die Nagra davon aus, dass nach Wasserzutritt die Korngrenzen durchwegs mit Wasser benetzt werden und dass die gesamte IRF sofort ins Wasser freigesetzt wird.

Bei einem hohen Abbrand (über ca. 50 GWd/t_{SM}) ist der Randbereich der Brennstofftabletten in der Struktur stark verändert (Korngrößen und Porosität). Es ist zu erwarten, dass die IRF aufgrund des veränderten Randbereichs erhöht wird.

Zur Grösse der IRF liegen relativ wenig direkte Beobachtungen vor. Hingegen ist die Freisetzung der Spaltgase Xenon und Krypton ausführlich untersucht worden. Die Annahmen über die Freisetzung der IRF anderer Radionuklide werden mittels einer Korrelation der gemessenen IRF mit der Xenon-Freisetzung hergeleitet.

Die Datengrundlagen bezüglich der IRF wurden von externen Experten der HSK geprüft (CNWRA 2004) und die Schlüsse der Nagra im Generellen gutgeheissen. Dennoch sind die folgenden Bemerkungen angebracht.

Für Brennstoffe mit einem Abbrand von 48 GWd/t_{SM} definiert die Nagra sowohl „Referenzwerte“, wie auch höhere „begrenzende Werte“. Für Brennstoffe mit höheren Abbränden werden nur begrenzende Werte festgelegt. Während die externen Experten der HSK die Referenzwerte des IRF für die einzelnen Nuklide als vernünftig bis pessimistisch einstufen, sind nach ihrer Meinung einzelne der als begrenzend bezeichneten Werte für die IRF zu niedrig gewählt. Für ¹²⁹I empfehlen die Experten beim mittleren Abbrand von 75 GWd/t_{SM} einen begrenzenden Wert von etwa 32 % IRF, statt 25 % gemäss Annahmen der Nagra (siehe Tabelle 4.5-1). Die Annahmen der Nagra für die IRF von ¹³⁵Cs werden hingegen als pessimistisch eingestuft, da z.B. die Tendenz zur Bildung von Cäsiummolybdat und Cäsiumuranat nicht berücksichtigt wurde. Auch werden die Annahmen über die IRF von ⁹⁹Tc als pessimistisch betrachtet, da Tc in der Brennstoffmatrix in der Form von „five-metal epsilon particles“ stärker gebunden ist, als es die Nagra voraussetzt. Den begrenzenden

Wert der IRF für ^{36}Cl beim mittleren Abbrand von $75 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ hat die Nagra gleich demjenigen für ^{129}I (25 %) gesetzt. Gemäss Ansicht der Experten der HSK ist das Gleichsetzen der Werte vernünftig. Da aber der Wert der IRF für ^{129}I als zu tief beurteilt wurde, ist vorsichtigerweise der Wert für ^{36}Cl ebenfalls als zu tief anzusehen. Auch bei der Annahme der besagten höheren Werte bleiben aber die errechneten Dosiswerte weit unterhalb des Dosisgrenzwerts der Richtlinie HSK-R-21.

Zusätzlich zur Berechnung der Freisetzung im Referenzfall und bei einzelnen davon abweichenden Varianten, untersuchte die Nagra den Einfluss der Ungewissheit über die Parameterwerte mittels einer probabilistischen Berechnung, bei der statt eines Einzelwertes eines Parameters wie die IRF eine statistische Verteilung die Grundlage bildet. Die statistische Verteilung, die die Nagra für das IRF wählt, ist eine logarithmische Gleichverteilung im Intervall zwischen dem Referenzwert bei $48 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ und dem begrenzenden Wert bei $75 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ für UO_2 -Brennstoff eines Druckwasserreaktors. Die Form der Verteilung wird von den Experten der HSK akzeptiert. Die Freisetzung von ^{129}I und ^{36}Cl könnte aber unterschätzt werden, weil die oberen Grenzen ihrer Verteilungen zu tief gewählt sind.

Die Nagra geht bei der Festlegung der unterschiedlichen Brennelementdaten für den Referenzfall der Sicherheitsanalyse von Brennelementen mit einem Abbrand von $48 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ aus. Dieser Wert wurde als Mittelwert über die Abbrände der heute vorhandenen und erwarteten Brennelemente hergeleitet. Verschiedene Eigenschaften, insbesondere auch die IRF, sind vom Abbrand abhängig und es besteht a priori kein Anlass zur Annahme, dass die Abhängigkeit über weite Bereiche des Abbrands linear sei. Insbesondere ist das der Fall für die IRF, da bei Abbränden über $50 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ mit der Ausbildung eines porösen Randbereiches gerechnet werden muss. Unter der plausiblen Annahme, dass die IRF wegen des porösen Randbereiches eher höher ausfällt, ist die Abhängigkeit der IRF vom Abbrand durch eine konvexe Kurve gegeben und der Wert der IRF bei $48 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ eine Unterschätzung des wirklichen Mittelwertes der IRF der zu betrachtenden Brennelemente.

Die IRF-Werte beziehen sich durchwegs auf den Brennstoff verhältnismässig kurze Zeit (Jahre bis Jahrzehnte) nach der Entnahme aus dem Reaktor. Die Freisetzung im Tiefenlager findet aber im Referenzfall der Nagra erst nach dem Versagen der Endlagerbehälter nach 10'000 Jahren statt. Es ist zu erwarten, dass die IRF der langlebigen Spaltprodukte während dieser Zeit durch die weitere Diffusion der Radionuklide zu den Korngrenzen zunehmen wird. Grobe Abschätzungen in Ferry et al. (2003) deuten auf eine Erhöhung der IRF-Werte um 4-5 % (je nach Abbrand) in 10'000 Jahren hin. Bestätigt sich diese Abschätzung, könnte die IRF auch deutlich höher sein als die Nagra im Referenzfall der Sicherheitsanalyse angenommen hat (bis zu einem Faktor 2 für ^{135}Cs beim Abbrand von $48 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$). Da die maximale Dosis in der Biosphäre auf die Freisetzung der IRF zurückzuführen ist, sollte die Nagra diese Untersuchungen im Falle einer Fortführung des Projekts verfolgen. Die Nagra beteiligt sich bereits an einem EU-Forschungsprojekt, das sich unter anderem mit der Frage der Zunahme der IRF während der Tiefenlagerung befasst („Spent Fuel Stability under Repository Conditions“). Da die im Sicherheitsnachweis errechneten Dosiswerte durchwegs sehr gering sind, ist der Sicherheitsnachweis durch diese Ungewissheit nicht in Frage gestellt.

Brennstoffmatrix

Für die Berechnung der Freisetzung im Referenzfall geht die Nagra von demjenigen Modell aus, das zu grösserer Freisetzung führt: Die Auflösung des Brennstoffs mit den darin enthal-

tenen Radionukliden findet aufgrund der Oxidation von U(IV) zu U(VI) statt. Die Oxidation ist ihrerseits die Folge der α -Radiolyse des Wassers und hängt von der Strahlungsintensität ab. Der so genannte G-Wert setzt das Ausmass der Radiolyse in Beziehung zur verursachenden Radioaktivität. Der von der Nagra verwendete effektive G-Wert von 0.01 wird von den externen Experten (CNWRA 2004) der HSK als für die Bedingungen im Tiefenlager konservativ eingestuft. Es wird bei dieser Beurteilung berücksichtigt, dass aus der Korrosion des Eisens im Nahfeld des Tiefenlagers ein hoher Partialdruck von H_2 besteht, sodass H_2 bezüglich der Oxidation mit dem Uran in Konkurrenz steht.

Bei der Analyse der experimentellen Grundlagen der Auflösungsrate spielen Annahmen über die zugängliche Oberfläche der Brennstoffmatrix eine Rolle. Die Nagra zitiert in den Gesuchsunterlagen einen Wert, der für Uranoxid-Brennstoff eines anderen Reaktortyps (CANDU) bestimmt wurde (Johnson 1982). Ergänzende Informationen der Nagra (Johnson 2004) weisen auf die Verwendung eines vergleichbaren Wertes für Brennstoff aus Leichtwasserreaktoren hin (Gray und Thomas 1994). Die Bestimmung der Oberfläche ist mit Ungewissheit behaftet; andere Messmethoden können zu einem rund zehnfach höheren Wert führen (Johnson 2004).

Die Form sowie die Eckwerte der von der Nagra verwendeten Wahrscheinlichkeitsverteilung (logarithmische Gleichverteilung) der Auflösungsrate werden von den externen Experten der HSK kritisch beurteilt. Die Eckwerte werden bei den Resultaten beider Auflösungsmodelle für einen Brennstoff mit $48 \text{ GWd}/t_{SM}$ Abbrand angesetzt. Da der Höchstwert der Verteilung sich an Uranoxidbrennstoff mit lediglich $48 \text{ GWd}/t_{SM}$ Abbrand orientiert, sind die höheren Auflösungsrate von MOX-Brennelementen mit demselben Abbrand (wegen der höheren α -Strahlung) und solche von allen Brennelementen höheren Abbrands nicht berücksichtigt.

Die Auflösungsrate des Brennstoffs ist nicht ein für die maximale Freisetzung in die Biosphäre empfindlicher Parameter. Im Rahmen ihrer Analyse berechnet die Nagra die radiologischen Folgen einer Erhöhung der Auflösungsrate um einen Faktor 10 und sogar 100. In beiden Fällen wird der Dosisgrenzwert der Richtlinie HSK-R-21 deutlich eingehalten. Die HSK beurteilt deshalb die Modellbeschreibung der Auflösung der abgebrannten Brennelemente unter den im Tiefenlager vorherrschenden Bedingungen im Rahmen des Entsorgungsnachweises als adäquat, obwohl nicht alle Modellparameter experimentell gut belegbar sind. Die Grundannahmen der Nagra, wie reduzierende Bedingungen in den Einlagerungstollen und eine Auflösung der UO_2 -Matrix primär durch α -Radiolyse, sind als sinnvoll anzusehen. Studien der Auflösungsrate abgebrannter Brennelemente (Röllin et al. 2001) bestätigen, dass die Raten unter reduzierenden Bedingungen mehrere Grössenordnungen kleiner sind als jene unter oxidierenden Verhältnissen. Die Auflösungsrate der Brennstoffmatrix wird demnach hauptsächlich durch die Zufuhr von oxidierenden Stoffen bestimmt. Sie kann in Anwesenheit von Wasserstoff deutlich reduziert werden, wie Messungen der Auflösungsrate von abgebrannten Brennelementen bei Drücken von 5 MPa Wasserstoff und in 5 MPa Argon zeigen (Spahiu et al. 2001). Die Bestimmung der Grösse der benetzten Oberfläche der Brennstoffmatrix ist wegen der Fragmentierung der Brennstofftabletten und den mikrostrukturellen Änderungen an den Rändern der Brennstofftabletten während der Bestrahlung schwierig. Dies ist speziell bei Brennelementen mit höherem als im Referenzfall der Nagra betrachteten Abbrand von Bedeutung.

IRF aus den Hüllrohren

Die Nagra zitiert experimentelle Beobachtungen zur Unterstützung ihrer Annahme, dass die Oxidschicht der Hüllrohre ca. 20 % des ^{14}C der Hüllrohre enthält (NTB 02-07). Dieser Anteil wird im Tiefenlager nach Wasserzutritt zu den Brennelementen rasch freigesetzt. Die HSK akzeptiert diese Annahme, weist aber darauf hin, dass die Datengrundlagen heute noch eher schmal sind.

Hüllrohrmetall

Die Angaben der Nagra zur Korrosionsrate von Zircaloy unter den Bedingungen des Tiefenlagers wurden von externen Experten der HSK geprüft (CNWRA 2004). Basierend auf den von der Nagra zitierten Arbeiten sowie einer Reihe weiterer Analysen (z.B. Hillner et al. 1994) wird die Korrosionsrate von $0.01\ \mu\text{m/a}$ als konservativ eingestuft.

Strukturteile

Die Strukturteile aus Zircaloy können modellmässig wie die Hüllrohre behandelt werden. Die Strukturteile aus Inconel werden nach Ansicht der Nagra bei ihrer (langsamen) Korrosion vor allem ^{59}Ni und ^{63}Ni freisetzen. Die Korrosionsraten werden denjenigen von Zircaloy gleich gesetzt. Die Berechnung der Freisetzung erfolgt zusammen mit derjenigen aus den Zircaloy-Teilen. Die Mengen dieser Nuklide sind gering und die Nuklide eher kurzlebig. Die Annahmen zur Korrosionsrate für Inconel werden deshalb von der HSK nicht weiter geprüft.

4.5.1.2 Verglaste hochaktive Abfälle

Angaben der Nagra

Verglaste hochaktive Abfälle entstehen aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen. Nach Entnahme von U und Pu für die Wiederverwendung in Brennelementen verbleiben die meisten Radionuklide in den zu verglasenden Abfällen. Die nach der Trennung in flüssiger Form anfallenden Abfälle werden bei hoher Temperatur mit glasbildenden Zusätzen vermischt und in Stahlkokillen abgefüllt. Verglaste Abfälle stellen eine Abfallform dar, die sich unter den Bedingungen im Tiefenlager durch eine hohe Einschlussfähigkeit für Radionuklide und eine kleine Korrosionsrate auszeichnet. Der Stahlkokille wird in der Sicherheitsanalyse keine Barrierenfunktion zugewiesen.

Empirisch findet man, dass die Auflösungsrate von Borosilikatglas in Wasser vom pH-Wert, von der Glaszusammensetzung und von der Konzentration des im Wasser gelösten SiO_2 abhängt. Wenn die Löslichkeitslimite von SiO_2 erreicht ist, sinkt die Rate auf die Langzeitauflösungsrate ab. Da Glas unter Raumtemperaturbedingungen thermodynamisch instabil ist, wird die Korrosion bis zur kompletten Auflösung des Glases weiterlaufen (NTB 02-21). Anfänglich werden Alkalimetalle bevorzugt gelöst, aber nach kurzer Zeit werden alle sich im Glaskörper befindlichen Nuklide mit der gleichen Rate anteilmässig freigesetzt.

Wasserinhaltsstoffe üben einen deutlichen Einfluss auf die Glaskorrosionsraten aus. Sorption von SiO_2 an (hauptsächlich von den Endlagerbehältern stammenden) Eisenkorrosionsprodukten oder an Bentonit erhöht die Glasauflösungsrate. Dieser Zusammenhang ist nicht überraschend, da sich der Langzeitwert der Glasauflösungsrate erst bei SiO_2 -Sättigung einstellt und die Auflösungsrate deshalb empfindlich von Mechanismen wie Sorption oder Diffusion abhängt, die SiO_2 aus der Lösung entfernen.

Die bei der Glaskorrosion im Tiefenlager ablaufenden Prozesse sind noch nicht im Detail zuverlässig bekannt. Dies erschwert die Übertragung von experimentell bestimmten Laborwerten auf die im Tiefenlager vorherrschenden Bedingungen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Auflösungsraten unter Tiefenlagerbedingungen um bis zu zwei Grössenordnungen grösser oder kleiner sind als heute erwartet (NTB 02-05, S. 144).

Die Nagra verwendet in der Sicherheitsanalyse Werte der Glasauflösungsraten, die am PSI durch Langzeit-Auslaugexperimente an Referenzgläsern bestimmt wurden (NTB 02-21). Die noch andauernden Messungen starteten im Dezember 1990 und zeigen, dass potenziell schädliche Effekte wie z.B. die Adsorption von gelöstem SiO_2 an Tonmineralien vorübergehender Natur sind und die Langzeitkorrosionsrate der HAA-Gläser kaum beeinflussen werden. Eisenkorrosionsprodukte binden ebenfalls SiO_2 , allerdings sind die gegenwärtigen Daten unzureichend, um deren Wirkung auf die Langzeitkorrosionsrate zu quantifizieren (NTB 02-21).

Die in der Sicherheitsanalyse verwendeten Referenzwerte für die Glasauflösungsraten der betrachteten verglasten Abfälle betragen $7.3 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ für Cogéma- und $5.5 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ für BNFL-Gläser. Da experimentell eine Temperaturabhängigkeit der Langzeit-Glasauflösungsraten nicht nachgewiesen werden konnte, wurde trotz des grossen Unterschieds zwischen der Temperatur der Laborexperimente bei 90°C und der im Endlager vorherrschenden Temperatur von rund 40°C auf eine Anpassung der Werte verzichtet (NTB 02-21).

Für die Glasauflösung und Freisetzung der Nuklide spielt ausser der Korrosionsrate des Glases die Grösse der zugänglichen Oberfläche und ihre zeitliche Entwicklung eine Rolle. Das HAA-Glas wird nach dem Vergiessen relativ schnell abgekühlt, um das Aussondern spezieller Phasen zu minimieren. Durch die thermischen Spannungen erhält der Glaskörper dabei Risse, die zu einer starken Vergrösserung der benetzbaren Oberfläche führen. In der Sicherheitsanalyse wird ein Faktor 15 für diese Vergrösserung angenommen. Die gesamte durch die thermische Beanspruchung entstehende Oberfläche nimmt am Auflösungsprozess teil.

Die Nagra macht für die Sicherheitsanalyse eine stark vereinfachende Annahme: Die durch die thermischen Belastungen im Glas entstandenen Teile werden als Kugeln gleicher Grösse betrachtet. Ihre Grösse und Anzahl ergibt sich aus der Bedingung, dass das gesamte Volumen und die Oberflächen aller Kugeln denen des geborstenen Glaskörpers entsprechen. Die Nagra nimmt ferner an, dass die Glaskorrosionsrate zeitlich konstant bleibt. Die Auflösungszeiten der Glaskugeln betragen im Referenzfall für Cogéma-Glas $6.8 \cdot 10^5$ Jahre und für BNFL-Glas $9.0 \cdot 10^4$ Jahre (NTB 02-06, S. A-37). Um den Einfluss von Ungewissheiten abschätzen zu können, hat die Nagra Ausbreitungsrechnungen mit einer stark erhöhten Glasauflösungsrate von $4.0 \cdot 10^{-2} \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ für beide Glastypen durchgeführt (NTB 02-05, Tab. 7.10-1). Wegen der langen Diffusionszeiten der dosisbestimmenden Nuklide ^{129}I und ^{79}Se im Opalinuston bleibt die maximale Strahlendosis gegenüber dem Wert des Referenzfalls unverändert.

Beurteilung der HSK

Die Nagra nimmt in ihrem Referenzfall an, dass die aus Stahl gefertigten Endlagerbehälter nach einer Lagerzeit von rund 10'000 Jahren undicht werden. Der anschliessende Zutritt von Grundwasser ins Innere der Behälter wird zur stetigen, langsamen Auflösung der verglasten

Abfälle führen. Unter den Tiefenlagerbedingungen wird die Auflösungsrate der Glasmatrix durch die Konzentration des herausgelösten SiO_2 empfindlich beeinflusst (für eine detailliertere Beschreibung und Beurteilung siehe HSK 23/50). Die Langzeitkorrosionsrate ist aus Laborexperimenten mit simulierten Abfallgläsern bekannt. Die in der Sicherheitsanalyse der Nagra verwendeten Langzeitraten für Cogéma- und BNFL-Gläser liegen im Bereich dessen, was experimentell für verwendete Borosilikatgläser gefunden wurde. In Anbetracht der bestehenden Unsicherheiten in der Bestimmung der Langzeitkorrosionsraten sind diese Werte nicht als konservativ zu betrachten.

Im Tiefenlager kann, sobald das Wasser Zutritt zum Glas hat, SiO_2 aus dem Glas durch den Endlagerbehälter in die Bentonitverfüllung diffundieren. Der Einfluss dieses Transportes auf die Korrosionsrate der Glasmatrix muss nach Ansicht der HSK noch weiter geklärt werden. Wie sich die unter den Bedingungen im Tiefenlager einstellende SiO_2 -Löslichkeitslimite und Glasauflösungsrate mit Werten aus Laborexperimenten vergleicht, ist nicht einfach abzuschätzen.

Auch die Temperaturabhängigkeit der Langzeitkorrosionsrate ist gegenwärtig nicht gut bekannt. Die experimentellen Werte gelten aber bei höheren (Referenzfall) oder vergleichbaren Temperaturen als jene, die gemäss der Sicherheitsanalyse nach dem Versagen der Endlagerbehälter vorherrschen. Sie dürften deshalb bezüglich der Temperaturabhängigkeit realistisch bis konservativ sein. Auf Grund der oben geschilderten Ungewissheiten über die effektive Langzeitraten wird in HSK 23/50 eine Langzeitkorrosionsrate empfohlen, die mit $7 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ um bis zu zwei Grössenordnungen höher ist als die von der Nagra in der Sicherheitsanalyse angenommenen Referenzwerte. Der in HSK 23/50 empfohlene Wert wird indessen mit der von der Nagra auch berücksichtigten stark erhöhten Glasauflösungsrate von $4.0 \cdot 10^{-2} \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ abgedeckt.

Die im Sicherheitsbericht angenommene Oberflächenvergrösserung um einen Faktor 15 liegt im Bereich dessen, was für die beiden Abfallgläser von Cogéma und BNFL erwartet wird. Bezüglich des Abfallglases der Cogéma ist der Wert konservativ gewählt, während für das BNFL-Glas maximal 20 erwartet wird (siehe HSK 23/50). Verglichen mit der Auflösungsrate ist die heutige Ungewissheit bezüglich der Oberflächenvergrösserung von geringerer Bedeutung.

Die HSK hat gegen die Modellierung des zerbrochenen Glases als eine Ansammlung gleich grosser Kugeln vorläufig keine Einwände. Diese Modellierung basiert teilweise auf konservativen Ansätzen wie die Annahme gleich grosser Bruchstücke und einer sofortigen Benetzung der gesamten Glasoberflächen. Die HSK verwendet dieses Modell auch für eigene Berechnungen.

Der Einfluss der Modellannahmen betreffend Korrosionsraten auf die Nuklidfreisetzung ist gering. Die Konzentrationen vieler Radionuklide sind im Porenwasser innerhalb der Bentonitverfüllung durch Löslichkeitslimiten eingeschränkt und so von der Auflösungsrate des Glases entkoppelt. Die Ausbreitungsrechnungen der Nagra zeigen, dass aufgrund der Rückhalteeigenschaften der technischen und natürlichen Barrieren die Werte der Auflösungszeiten und so der Langzeitkorrosionsraten der Gläser einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Strahlendosen in der Biosphäre haben. Auch die internationale Expertengruppe der NEA kommt zum Schluss, dass das Auflösungsverhalten der Glasmatrix für die Sicherheitsanalyse der Nagra nicht kritisch ist (NEA 2004, S. 73).

4.5.1.3 Beitrag der Abfallmatrizen zur Sicherheit

Sowohl die Matrix des abgebrannten Brennstoffs wie auch die verglasten Abfälle stellen unter den im Tiefenlager vorherrschenden reduzierenden Bedingungen und dem geringen Wasseraustausch äusserst stabile Abfallformen dar, die sich durch hohe Einschlussfähigkeit für Radionuklide und kleine Korrosionsraten auszeichnen.

Die Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre während der ersten Million von Jahren ist nicht durch die Auflösungsraten der Abfallmatrizen bestimmt, sondern massgeblich durch die so genannte instant release fraction (IRF) der Brennelemente. Das sind Radionuklide, die sich in Hohlräumen, Korngrenzen und Randbereichen der Brennstofftabletten sowie in der Oxidschicht der Hüllrohre anhäufen. Sobald Wasser Zutritt zu den Brennelementen findet, können diese Radionuklide schnell aus dem Abfall freigesetzt werden. Der Anteil der IRF kann einige Prozente des Gesamtinventars der Brennelemente betragen.

Die von der Nagra für die Sicherheitsanalyse getroffenen vereinfachenden Annahmen zum zeitlichen Verlauf der Korrosion von Brennstoffmatrizen, Hüllrohren, Strukturteilen wie auch der verglasten HAA werden von der HSK als vertretbar und zweckmässig eingestuft.

4.5.2 Abfallbehälter

4.5.2.1 Behälterauslegung und -herstellung

Angaben der Nagra

Die Endlagerbehälter für abgebrannte Brennelemente und verglaste hochaktive Abfälle werden hauptsächlich in NTB 02-05 (Kap. 4.5 und 5.3) und NTB 02-11 der Nagra beschrieben. Die Nagra bezieht sich in ihrer Sicherheitsanalyse auf Referenzbehälter aus Stahl für die abgebrannten Brennelemente und die verglasten hochaktiven Abfälle. Sie nennt als alternative Lösung für die Brennelemente einen Behälter aus Kupfer mit einem Innenbehälter aus Stahl und erwähnt weitere Materialoptionen.

Die zylindrischen Brennelementbehälter aus Stahl haben je nach Brennelementtyp eine Länge von 4.4 bis 4.94 m. In der Sicherheitsanalyse wird eine mittlere Länge von 4.6 m verwendet. Diese Behälter haben einen Durchmesser von 1.05 m und eine minimale Wandstärke von rund 15 cm (Deckel und Boden 13.5 cm). Die ebenfalls kreiszylindrischen Behälter für verglaste hochaktive Abfälle haben eine Länge von 2 m, einen Durchmesser von 0.94 m und eine minimale Wandstärke von 25 cm. Die Deckel werden mit einer Schweissnaht zum Behälter dicht verschlossen. Die Nagra sieht auch die Möglichkeit vor, die Deckel zusätzlich mit einem Schraubengewinde zu versehen.

Bezüglich der mechanischen Eigenschaften der Behälter für verglaste HAA verweist die Nagra auf ihre Untersuchungen im Rahmen des Projekts Gewähr 1985 (NTB 84-31). Die mechanische Festigkeit der Behälter für abgebrannte Brennelemente ist für isotrope Belastung (Sprysl und Gribi 2000), hingegen noch nicht für anisotrope Belastung untersucht worden. Die Nagra hat ihre Arbeiten zum BE-Behälter bisher auf das für das Einschlussvermögen und für die Gasbildung im Tiefenlager entscheidende Korrosionsverhalten des Werkstoffs konzentriert. Die minimale Auslegungslbensdauer der Behälter für BE und für HAA beträgt 1000 Jahre, während die erwartete Lebensdauer mindestens 10'000 Jahre beträgt.

Im Referenzfall der Sicherheitsanalyse geht die Nagra von einer Lebensdauer der Behälter von 10'000 Jahren aus. Nach dieser Zeitdauer werden die Behälter in der Analyse nicht mehr als Barriere für die Freisetzung von Radionukliden beansprucht.

Der Behälter für verglasten HAA besteht aus Stahlguss (GS 40). Der Behälterkörper wird mit dem Behälterboden in einem Stück gegossen. Der Deckel besitzt ein Schraubengewinde und wird zudem an den Behälterkörper angeschweisst.

Bezüglich der Herstellung der Referenzbehälter für Brennelemente nennt die Nagra ein Verfahren, bei dem die Behälterkörper aus drei Teilzylindern zusammengeschweisst würden, wobei der rechteckige Innenraum erst nachträglich ausgefräst, eine Bodenplatte angeschweisst und Einbauten für die Brennelemente angebracht würden.

Bezüglich der Bauart des als Alternative genannten Behälters aus Kupfer mit Innenbehälter aus Kugelgraphitgusseisen verweist die Nagra (NTB 02-11) auf die vorgesehene Auslegung solcher Behälter bei der schwedischen Endlagerorganisation SKB. Der äussere Kupferbehälter besitzt eine Wandstärke von 3–5 cm (gemäss NTB 02-11), der innere Eisenbehälter eine Wandstärke von mindestens 5 cm. Der Behälterkörper des Kupferbehälters wird entweder in einem oder zwei Teilen hergestellt und mit dem Boden verschweisst (Werme 1998). Der Deckel wird ebenfalls mit einer Schweissnaht angefügt. Der Behälterkörper des Innenbehälters wird in einem Stück gegossen. Der Deckel des Innenbehälters wird mit einer Schraube befestigt.

Beurteilung der HSK

Die von der Nagra getroffene Wahl von Stahlguss als Material des Referenzbehälters hat sowohl Vorteile wie Nachteile. Vorteilhaft ist, dass die Eigenschaften des Materials recht gut bekannt sind und sein Verhalten unter den Endlagerbedingungen entsprechend gut vorher-sagbar ist. Ein weiterer Vorteil ist darin gegeben, dass die Korrosionsprodukte des Eisens und das bei der Korrosion entstehende Wasserstoffgas stabilisierend auf die Redox-Verhältnisse im Endlagernahfeld wirken. Der wichtigste Nachteil ist, dass die Korrosionsrate und damit die Bildungsrate des Wasserstoffgases zu hoch sind, als dass das Gas im Porenwasser gelöst bleiben würde. Die Folgen sind eine Druckerhöhung in der Nähe des Behälters und Durchpressen des Gases durch die Bentonitverfüllung. Die Korrosionsraten und die Auswirkungen der aus der anaeroben Korrosion durch Wasser entstehenden Gasmenge werden im Abschnitt 4.5.2.2 beurteilt.

Die zusätzlichen Schweissnähte, die bei der Herstellung des BE-Behälters aus Teilstücken entstehen, müssten noch in Bezug auf das langzeitige Korrosionsverhalten bewertet werden. Diese Schweissnähte können aber soweit erforderlich ausgeglüht und kontrolliert werden. Mit dem Giessen kleinerer Teilstücke vermeidet die Nagra Schwierigkeiten, die bei Giessversuchen ganzer Innenbehälter für den schwedischen Kupfer/Eisen-Behälter zutage getreten sind (Andersson 1998).

Die Nagra nennt zwei Schweissverfahren, die zum Schliessen der Stahlbehälter in Frage kämen: Schweissen mit Wolframanode und Inertgas (TIG) und Elektronenstrahlverfahren. Im von der Nagra zitierten Bericht JNC (2000) werden diese und verschiedene andere Schweissverfahren verglichen. Die TIG-Methode wird als vergleichsweise nachteilig geschildert, doch werden gewisse Entwicklungsmöglichkeiten der Methode angedeutet. Für das

Elektronenstrahlverfahren werden mehrere Vorteile genannt, darunter die konzentrierte, aber insgesamt geringere Wärmeabgabe an den Behälter, kleinere Anfälligkeit gegenüber Verunreinigungen in der Schweissnaht und vergleichsweise geringer Zeitbedarf. Es hat hingegen den Nachteil, dass das Schweißen in Vakuum ausgeführt werden muss. Das stellt Anforderungen bezüglich eines separaten dichten Verschlusses des unter Atmosphärendruck stehenden und kontaminierten Behälterinnenraums.

Wie bereits oben erwähnt, wurde die Festigkeit des BE-Behälters bei isotroper Belastung untersucht. Angesichts der Form dieser Behälter (rund fünfmal so lang wie breit) und der Möglichkeit anisotroper Belastung durch ein ungleichmässiges Aufsättigen und Quellen des Bentonits ist eine eingehendere Analyse der mechanischen Festigkeit der Behälter notwendig. Es ist empfehlenswert, frühzeitig Prototypen herstellen zu lassen, um rechtzeitig Erfahrungen mit den Prozessen der Herstellung und des Schweißens (auch des Deckels) zu sammeln.

Der alternative Kupfer/Eisenbehälter hätte den Vorteil, dass während der Lebensdauer der Kupferhülle (mehr als 100'000 Jahre, NTB 02-11) die Gasproduktionsrate im Nahfeld klein bleibt. Nach Versagen der Kupferhülle korrodiert der Innenbehälter (Graphit-Gusseisen) wiederum mit den Vorteilen und von den Gasmengen her etwas reduzierten Nachteilen dieses Vorgangs. Diese Behältervariante wirft aber andere Fragen auf, beispielsweise bezüglich der Folgen der Volumenzunahme von etwa einem Faktor 2 beim Korrodieren des Innenbehälters (bei noch weitgehend vorhandenem Aussenbehälter) oder der Frage der galvanischen Korrosion von Eisen und Kupfer. Diese zusätzlichen Probleme würden allerdings erst nach etwa 100'000 Jahren auftreten, wenn die Aktivität der Brennelemente sehr stark abgenommen hat. Die Nagra erwähnt die Möglichkeit eines keramischen Innenbehälters, der die angesprochenen Probleme nicht hätte.

Die praktische Möglichkeit der Herstellung der Kupferbehälter und der Innenbehälter ist durch die Herstellung von Prototypen im Rahmen des schwedischen Endlagerprogramms nachgewiesen worden (Andersson 1998, Andersson et al. 2004). Zum Verschliessen der Kupferbehälter werden zwei Schweißverfahren entwickelt. Beim einen handelt es sich um ein Elektronenstrahlverfahren. Beim anderen wird das Zusammenfügen durch mechanische Reibung unter Druckanwendung erreicht, wobei die Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur des Kupfers bleibt (friction stir welding, Andersson 2002). Zum Prüfen der Schweissnähte werden im schwedischen Endlagerprogramm ebenfalls zwei Verfahren entwickelt. Beim einen handelt es sich um ein Durchleuchtungsverfahren (Röntgenstrahlung), beim anderen wird Ultraschall verwendet (z.B. Stepinski et al. 2004). Die Fortschritte dieser Entwicklungen werden laufend in technischen Berichten veröffentlicht.

4.5.2.2 Korrosion von Eisenbehältern

Angaben der Nagra

Die Nagra beschreibt das Korrosionsverhalten der Behälter zusammenfassend in NTB 02-05, und detaillierter in NTB 02-11. Sie zitiert zahlreiche Untersuchungen und neuere Evaluierungen des Wissensstandes im Hinblick auf die Bedürfnisse der Tiefenlagerung, so insbesondere die japanische Endlagerstudie H12 (JNC 2000).

Die Ergebnisse der Nagra bezüglich der in 1000 oder 10'000 Jahren maximal zu erwartenden Korrosionsschäden an den Behältern weichen von ihren Schlussfolgerungen in den bezüglich der Nahfeldbedingungen ähnlichen Projekten Gewähr 1985 (NGB 85-04) und

Kristallin-I (NTB 93-22) ab. Gemäss den neuen Angaben läuft die Korrosion um etwa einen Faktor 10 langsamer ab. Das hat nicht nur für die Lebensdauer der Behälter eine Bedeutung, sondern auch für die Intensität und die möglichen Folgen der begleitenden Gasproduktion im Lagernahfeld. Die Nagra erklärt diese Änderungen durch neue Einsichten und besseres Verständnis der im Nahfeld des Tiefenlagers herrschenden Bedingungen und der Korrosionsvorgänge. Gestützt auf diese Fortschritte konnte sie Konservativitäten abbauen und weniger pessimistische Annahmen zu den Korrosionsraten und den beteiligten Korrosionsmechanismen treffen.

Die Nagra unterscheidet folgende Korrosionsvorgänge:

- Sauerstoffkorrosion: Unmittelbar nach der Einlagerung enthält das Endlagernahfeld Sauerstoff, der zur Korrosion der Behälter führen kann. Die Korrosion fängt aber nicht sofort an, sondern erst nach einigen Jahrzehnten, wenn die Aufsättigung des Nahfeldes durch Wasser fortgeschritten und Wasser im Kontakt mit dem Behälter ist. Ein Teil des Sauerstoffs wird durch andere Prozesse gebunden, wie die Oxidierung von Pyrit und Siderit, die im Bentonit enthalten sind, und durch die Korrosion von Eisenteilen, die bei der Einlagerung im Bereich der Tunnelwand verbleiben. Hier fängt die Korrosion früher an, weil sich die Wassersättigung früher einstellt. Sobald der Sauerstoff aufgebraucht ist, hört auch die Sauerstoffkorrosion auf. Die Dauer dieser Phase wird auf 2 bis 100 Jahre geschätzt (NTB 02-13).
- Sulfidkorrosion: Im Gegensatz zu früheren Projekten rechnet die Nagra mit keiner nennenswerten Sulfidkorrosion im Lagernahfeld. Sie stützt sich hier auf Untersuchungsergebnisse, die nahe legen, dass sulfatreduzierende Bakterien in kompaktiertem Bentonit nicht lebensfähig seien (z.B. Pedersen et al. 2000; JNC 2000).
- Anaerobe (anoxische) Korrosion: Das ist die Korrosion durch Wasser, die auch zur Bildung von Wasserstoff führt. Nach neuer Bewertung der vorhandenen Erkenntnisse wählt die Nagra einen im Vergleich zu früher kleineren Wert, nämlich $1 \mu\text{m/a}$, für die Korrosionsrate, die über lange Zeiträume massgebend ist. Die anaerobe Korrosion findet so lange statt, wie noch Eisen im Tiefenlager vorhanden ist.

Insgesamt rechnet die Nagra aus diesen Prozessen mit einer maximalen Korrosionstiefe von „wenigen Zentimetern“ (NTB 02-05) bzw. rund 2 cm (NTB 02-11) in 10'000 Jahren.

Als weitere Korrosionsvorgänge betrachtet die Nagra:

- Spannungsrisskorrosion: Aufgrund des Behältermaterials und der chemischen Bedingungen im Tiefenlager rechnet sie mit keiner Spannungsrisskorrosion, auch wenn Spannungen im Bereich der Deckelschweissnaht des Behälters vorhanden sind.
- Korrosion als Folge der Radiolyse des Wassers an der Behälteroberfläche: Hier sind die Strahlungsintensitäten zu klein, um einen bedeutenden Beitrag zur Korrosion erwarten zu lassen.

Im Weiteren wird die Möglichkeit der Schädigung der Behälter durch die Aufnahme von Wasserstoff, der durch den Korrosionsvorgang im Nahfeld erzeugt wird, in NTB 02-11 untersucht. Die Nagra kommt zum Schluss, dass für das vorgesehene weiche Stahlmaterial bei den voraussichtlichen H_2 -Konzentrationen im Tiefenlager nicht mit Wasserstoffschäden (z.B. Wasserstoff-Spannungsriss oder Blasenwachstum) am Behälter zu rechnen sei.

Beurteilung der HSK

Die Abschätzung der Korrosion der Stahlbehälter in den bisherigen HAA-Lagerprojekten der Nagra, Projekt Gewähr 1985 und Kristallin-I, stützte sich hauptsächlich auf Untersuchungen, die vor Mitte der achtziger Jahre stattgefunden hatten. Die unmittelbare Umgebung der Behälter war in diesen Projekten wie heute eine Bentonitschicht, das Wirtgestein war hingegen Kristallin. In den zwanzig Jahren hat es Fortschritte im Verständnis der Korrosionsvorgänge unter den speziellen Umgebungsbedingungen eines Tiefenlagers gegeben. Es ist deshalb zu begrüßen, dass die Nagra eine neue Evaluierung vorgenommen hat. Im Folgenden werden die einzelnen Aspekte kommentiert.

Die Sauerstoffkorrosion

Gemäss Nagra (NTB 02-11) beträgt die anfängliche relative Luftfeuchtigkeit in den Poren des Bentonits etwa 5 %. Sie liegt weit unter der Grenzfeuchtigkeit im Bereich von 30-60 %, oberhalb welcher mit Korrosion an der Luft gerechnet werden muss. Deshalb erwartet Nagra nicht einen sofortigen Beginn der Korrosion der Endlagerbehälter. Die Schätzung der Porenluftfeuchtigkeit basiert auf Erfahrungswerten aus der Bodenphysik (Marshall und Holmes 1979) ausgehend von einem angenommenen Wassergehalt des Bentonitgranulats von ca. 2 % (Gewicht). Die Angabe des Wassergehalts wird auf NTB 92-06 zurückgeführt, wo allerdings 1 % als für die Granulatherstellung optimaler Wert empfohlen wird. Ein Wassergehalt der Granulatkörner (Trockendichte 2100-2200 kg/m³) von 2 % entspricht einer Wassersättigung von 20 % und, je nach Temperatur, einer relativen Feuchtigkeit von 10-20 % in den Poren der Granulatkörner (gemäss Kennwerten in Marschall et al. 2005). Erst bei einer Verteilung des Wassers auf das gesamte Porenvolumen des Granulats von rund 46 % resultiert eine relative Feuchtigkeit im Bereich von 5 %. Bei der Schätzung der anfänglichen relativen Feuchtigkeit ist aber zu berücksichtigen, dass das Bentonitgranulat beim Einbringen mit der Stollenluft vermischt ist, die möglicherweise eine hohe Luftfeuchtigkeit hat (NTB 02-02, Kap. 3.4). Die HSK geht deshalb davon aus, dass die anfängliche Luftfeuchtigkeit im Granulat deutlich höher sein könnte als die von der Nagra angegebenen 5 %. Die HSK erwartet trotzdem nicht, dass eine Korrosion der Behälter sofort nach der Verfüllung der Stollen anfängt, da die Temperaturverteilung im Nahfeld die Feuchtigkeit von der heissen Oberfläche des Endlagerbehälters fernhalten wird.

Die Nagra zitiert ihre Berechnung im Projekt Kristallin-I bzw. Gewähr, wonach der gesamte Sauerstoff, der in den Bentonitporen vorhanden ist, zu einer gleichmässigen Korrosionstiefe der Behälter von höchstens 1 mm führen kann. Dieses Ergebnis lässt sich auf die HAA- und BE-Behälter im vorliegenden Projekt sinngemäss übertragen, wobei die verfügbare Menge an Sauerstoff wegen des kleineren Stollendurchmessers (2.5 m statt 3.7 m in Kristallin-I und Projekt Gewähr) geringer ist. Es ergibt sich eine maximale Korrosionstiefe von rund 0.2 mm. Im NTB 02-13 (Appendix A) wird eine ähnliche Bilanz für die BE-Behälter im Projekt Opalinuston betrachtet. Hier beträgt die maximale Tiefe der gleichmässigen Korrosion weniger als 0.1 mm, weil einerseits das Verhältnis der angenommenen Behälteroberfläche zur vorhandenen Menge an Sauerstoff etwas grösser ist und andererseits eine weniger konservative Annahme über das entstehende Korrosionsprodukt getroffen wird (andere Stöchiometrie). Die Nagra erwähnt aber die Möglichkeit einer ungleichmässigen Korrosion, einerseits durch ungleichmässige Feuchteverteilung, z.B. als Folge einer ungleichmässigen Temperaturverteilung am Behälter, und andererseits wegen Korrosion durch Lochfrass (NTB 02-11). Die Bedeutung der erstgenannten Art von ungleichmässiger Korrosion wird von der Nagra nicht

weiter untersucht. Da die Abschätzung der Korrosionstiefe auf der Menge des im Nahfeld vorhandenen Sauerstoffs beruht, ist die Frage der (grossflächig) ungleichmässigen Korrosion wichtig. Wird der gesamte Sauerstoff zum Korrodieren z.B. eines Drittels der Behälteroberfläche verwendet, ist eine dreimal so grosse Korrosionstiefe möglich als bei einer vergleichbaren Korrosion der ganzen Behälteroberfläche.

Für die zu erwartende Lochfrasstiefe zitiert die Nagra experimentelle Ergebnisse (Zusammenstellung in JNC 2000), die zeigen, dass die Lochfrasstiefe eine vom Fortschritt der mittleren Korrosion abhängige obere Grenze hat. Bei der detaillierten Analyse in NTB 02-11 stützt sich die Nagra auf diese Korrelation der Lochfrasstiefen mit der allgemeinen Korrosion und schliesst auf eine maximale Korrosionstiefe von 1 cm. Diese Überlegung ist nachvollziehbar. Dennoch ist zu bedenken, dass die verwendete Korrelation aus Experimenten bei voll gesättigten Verhältnissen gewonnen wurde, und die Anwendung auf den Zustand im Nahfeld des Tiefenlagers im Opalinuston, wo die Korrosion voraussichtlich bei nur teilweise gesättigten Verhältnissen einsetzt, nicht zweifelsfrei nachgewiesen ist (JNC 2000).

Im Sicherheitsbericht verweist die Nagra schliesslich auf den möglichen Verbrauch des Sauerstoffs durch die Oxidation von Pyrit und Siderit im Bentonit und im benachbarten Opalinuston noch bevor die Korrosion des Eisenbehälters einsetzt. Dadurch würde das Ausmass der Behälterkorrosion reduziert. In Bezug auf den Bentonit ist allerdings davon auszugehen, dass er bereits vor dem Einbringen ins Tiefenlager dem Sauerstoff ausgesetzt war und deshalb im Tiefenlager kaum wesentlich zur Bindung des Sauerstoffs beitragen kann.

Sulfidkorrosion

Im Projekt Kristallin-I rechnete Nagra mit einer Korrosionsrate von ca. 1 cm in 1000 Jahren durch Sulfidkorrosion. Diese Schätzung basierte auf der Abschätzung der Menge an Sulfationen, die im Bentonitporenwasser zum Behälter diffundieren können. Es wurde angenommen, dass die Reduktion zu Sulfid in der Nähe der Behälteroberfläche durch sulfatreduzierende Bakterien stattfindet.

Im vorliegenden Projekt rechnet die Nagra mit keiner bedeutenden Sulfidkorrosion (weniger als 1 mm in 10'000 Jahren), aufgrund der Annahme, dass im Bentonit keine sulfatreduzierende Bakterien lebensfähig seien. Die Situation ist nach Ansicht der HSK nicht eindeutig klar. Die Nagra zitiert Untersuchungen, die nahe legen, dass keine solchen Bakterien bei Trockendichten über 1.5 t/m^3 im Bentonit aktiv sind (Pedersen et al. 2000). Das entspricht aber gerade der Trockendichte des Bentonitgranulats nach dem Einbringen in den Stollen. Durch die Konvergenz des Stollens erhöht sich die Trockendichte der Bentonitverfüllung in Laufe der Zeit. Wie viel Bakterienaktivität noch möglich ist, insbesondere an der Behälteroberfläche (erhöhte Temperatur), bleibt deshalb offen. In NTB 02-11 wird auch auf JNC (2000) hingewiesen, wo weitere Untersuchungen angeführt werden, die gegen die Vermehrung von sulfatreduzierenden Bakterien im Bentonit sprechen. Allerdings weisen die Autoren darauf hin, dass der Umfang der Untersuchungen klein sei und deshalb weitere Untersuchungen zur Klärung der Sachverhalte nötig wären.

Auch wenn sulfatreduzierende Bakterien im Bentonit nur eingeschränkt lebensfähig sind, ist denkbar, dass solche Bakterien aus dem Opalinuston durch den Bentonit an die Behälteroberfläche gelangen könnten. Untersuchungen von Pusch (1999) zeigen aber, dass im Bentonit mit der hier relevanten Trockendichte die untersuchten sulfatreduzierenden Bakterien

immobil sind. Für das vorliegende Projekt bedeutet das, dass eine Bakterienmobilität im Bentonit nur solange zu erwarten ist, wie die Granulatstruktur trotz Aufsättigung noch vorhanden ist.

Die Angabe einer Korrosionstiefe von weniger als 1 mm in 10'000 Jahren rührt von Modellberechnungen in Wersin et al. (1994) her. Die Berechnungen beruhen auf einem stark vereinfachenden Modell, dessen Konservativität bezüglich des Diffusionsprozesses, der hier ratenlimitierend ist, nicht evident ist. Eine Abschätzung gemäss NTB 85-26, basierend auf der Diffusion bei voll gesättigtem Bentonit, würde auch nach Berücksichtigung der heutigen Kenntnisse der Diffusionskonstanten und zugänglichen Porositäten im Bentonit zu grösserer Korrosion der Behälter führen. In dieselbe Richtung weisen Untersuchungen von King et al. (2001), die auf eine stärkere Korrosion schliessen lassen, falls sulfatreduzierende Bakterien im Opalinuston lebensfähig bleiben. Die HSK sieht es deshalb als notwendig an, die Frage der Sulfidkorrosion weiter zu untersuchen. Dies insbesondere, weil die angenommene Reaktion zur Freisetzung von Wasserstoffgas führen würde.

Anaerobe Korrosion durch Wasser

Die Nagra evaluiert eine Reihe von Untersuchungen der anaeroben Korrosion unter Bedingungen, die für das Tiefenlager relevant sind. Insbesondere jüngere Untersuchungen sind mit der Vorstellung konsistent, dass die Korrosionsrate unter gesättigten Bedingungen nach einer Anfangsphase von wenigen Wochen auf Werte von weniger als 1 $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ abnehmen. Eine Ausnahme bildet eine Untersuchung aus den achtziger Jahren (NTB 86-25), wo Raten zwischen 4 und 13 $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ beobachtet wurden. Diese Messungen wurden teilweise bei den für das Lagernahfeld in den ersten Jahrhunderten relevanten höheren Temperaturen (140°C) gemacht. Ansonsten sind die Experimente entweder bei geringerer Temperatur oder über verhältnismässig kurze Zeit, oder beides, durchgeführt worden. Keines der zitierten Experimente dauerte länger als ein Jahr. Die Nagra weist aber darauf hin, dass archäologische Funde mit der Annahme von Korrosionsraten im Bereich 0.1 bis 10 $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ vereinbar sind.

Bei Temperaturen unter 90°C wurde in Smart et al. (2001) aufgrund von Beobachtungen die Langzeitrage als temperaturunabhängig beschrieben. Der grösste Teil der Korrosion im Tiefenlager wird bei Temperaturen der Behälteroberfläche unter 90°C stattfinden.

Die ungleichmässige Benetzung des Metalls mit Bentonitporenwasser beeinflusst die anfänglichen Korrosionsraten. Nach Smart et al. (2001) ist der Einfluss auf die Langzeitrage (d.h. nach einigen Wochen) klein.

Aufgrund des heutigen Standes der Kenntnisse der Korrosionsvorgänge bei anaeroben Bedingungen unterstützt die HSK die Verwendung der konservativen Korrosionsrate von 1 $\mu\text{m}/\text{Jahr}$.

Nach vollständiger Korrosion des Behältermaterials wird die Volumenzunahme infolge der kleineren Dichte der Korrosionsprodukte etwa einen Faktor zwei betragen. Dadurch entsteht ein zusätzlicher Beitrag zum Druckaufbau im Lagernahfeld, den es zu berücksichtigen gilt.

Schweissnähte

Gemäss dem in NTB 02-11 beschriebenen Konzept wären die Brennelementbehälter aus mehreren Stücken zusammengeschweisst. Die Schweissnähte können im Herstellungsprozess ausgeglüht werden, sodass keine übermässigen Spannungen verbleiben. Bei der Fest-

legung der Schweissmethode muss aber auch die Frage nach deren möglichem Einfluss auf die Korrosion gestellt werden. In Smart et al. (2001) wurde keine erhöhte Korrosion bei Schweissnähten festgestellt, wobei das Schweissmaterial dieselbe Zusammensetzung wie das Eisenstück hatte. Die HSK empfiehlt dennoch, bei der allfälligen weiteren Projektentwicklung die Bedeutung der Schweissnähte für das langfristige Korrosionsverhalten zu untersuchen.

Die Schweissnaht, die den Deckel mit dem Behälterkörper verbindet, muss automatisch oder fernbedient angebracht werden, da das Strahlungsfeld der im Behälter enthaltenen Abfälle intensiv ist. Die Prüfung der Schweissnaht muss ebenfalls automatisch oder fernbedient stattfinden. Die HSK ist der Ansicht, dass diese Aufgaben mit den heutigen technischen Mitteln bewältigt werden können. Sie wird, im Falle der Fortführung des Projektes, im Rahmen der Bewilligungsverfahren die anzuwendenden Verfahren auf die Eignung prüfen.

Spannungsrissskorrosion

Die Schweissnaht am Deckel des Behälters wird kaum ausgeglüht werden können, da sonst die Temperatur im Behälterinneren zu stark ansteigen würde. In NTB 92-14 wird darauf hingewiesen, dass die Spannungen im Bereich dieser Schweissnaht bei den HAA-Behältern deshalb in der Nähe der Fließgrenze sein können. Als alternative Massnahme zum Ausglühen erwähnt Nagra in NTB 02-11 eine lokale Druckverformung (shot-peening), die an der Oberfläche der Schweissnaht für kompressive Spannung sorgt. Es gibt Hinweise darauf (LLNL 2001), dass mit geeigneten Methoden (Laser) eine wesentlich tiefere Kompressionschicht erreicht werden kann (ca. 2 mm), als in NTB 02-11 angenommen (einige Zehntelmillimeter) wird.

Die Nagra argumentiert auch, dass die Umgebungsbedingungen für eine Spannungsrissskorrosion nicht gegeben sein werden, insbesondere, da der dazu erforderliche pH-Bereich im Bentonitporenwasser nicht vorliegen werde. Hier möchte die HSK zu Vorsicht raten; es muss zuerst geklärt werden, ob die pH-Werte an der Behälteroberfläche denjenigen des Bentonitwassers gleich sind.

Die HSK hat sich bezüglich der Korrosionsraten von Stahlguss zusätzlich von externen Experten beraten lassen (CNWRA 2004). Die Experten unterstützen weitestgehend die Schlussfolgerungen der Nagra.

Gesamtbeurteilung

Die HSK teilt in den meisten Fällen die Schlussfolgerungen der Nagra zu den zu erwartenden Korrosionsraten. Sie nimmt aber zur Sulfidkorrosion eine vorsichtiger Haltung ein. Konservativerweise könnte von einer Sulfidkorrosion etwa entsprechend den Abschätzungen im Projekt Kristallin-I (NTB 93–22) ausgegangen werden, d.h. 10 µm/a. Dann wäre die Sulfidkorrosion der langfristig dominierende Korrosionsvorgang. Die Korrosionstiefe würde in 1000 Jahren etwa 2 cm erreichen, in 10'000 Jahren etwa 11 cm. Bei der Behälterwandstärke der BE-Behälter von 15 cm und bei Berücksichtigung der Druckbeanspruchung im Tiefenlager wäre die minimale Lebensdauer von 1000 Jahren zwar erreicht, die vermutete Lebensdauer von 10'000 Jahren oder mehr aber in Frage gestellt. Die Abschätzungen im Projekt Kristallin-I berücksichtigen die reduzierte Beweglichkeit negativ geladener Ionen im Bentonit (siehe Abschnitt 4.5.3.9) nicht. Die Korrosionsrate wird dadurch überschätzt. Die HSK erachtet es als wichtig, eine tiefere aber noch gesicherte obere Grenze zu bestimmen.

4.5.2.3 Korrosion von Kupferbehältern

Angaben der Nagra

Bezüglich des Korrosionsverhaltens der Kupfer/Eisen-Behälter weist die Nagra vor allem auf Ergebnisse der entsprechenden Studien im Rahmen ausländischer Entsorgungsprogramme. In NTB 02-11 werden die wichtigsten Ergebnisse der Übersichtsdarstellung in King et al. (2001) zusammengefasst und auf die Unterschiede zu den schweizerischen Verhältnissen hingewiesen. Im Vergleich zu anderen Entsorgungsprojekten wird im vorliegenden Projekt von höheren Temperaturen im Nahfeld ausgegangen. Die Auslegung des Lagers ist auch zum Teil anders (Behälter in der Stollenachse liegend eingelagert, gegenüber der vertikalen Einlagerung in Bohrlöcher im Boden der Stollen). Die Nagra erwartet aber daraus keine grundsätzlichen Abweichungen im Korrosionsverhalten des Behältermaterials.

Wie bei den Stahlbehältern ist zwischen der Korrosion bei aeroben und bei anaeroben Verhältnissen zu unterscheiden. Während der aeroben Korrosion wird der noch im Lagernahfeld vorhandene Sauerstoff unter Bildung von Cu_2O und von löslichen Kupfer-Chlorverbindungen konsumiert. Bei anaeroben Verhältnissen bildet sich unter Spaltung von Wasser auch Cu_2O . Das geschieht aber nur bei Vorhandensein von Sulfid in der Lösung. Die Nagra geht davon aus, dass sulfatreduzierende Bakterien im Bentonit nicht aktiv sein können. Deshalb wird die unter Sulfidbeteiligung ablaufende Korrosion durch die bei Ausschöpfung der Löslichkeitsgrenze des Sulfids im Bentonit vorhandenen sowie die aus dem Opalinuston durch die Bentonitverfüllung zum Behälter hin diffundierenden Sulfide bestimmt.

Insgesamt rechnet die Nagra mit einer maximalen Korrosionstiefe von rund 4 mm in 100'000 Jahren, wobei ein konservativer Zuschlag von einem Faktor 5 für Lochfrass berücksichtigt wurde. Bei einer angenommenen Kupferwandstärke von 5 cm ist in diesem Zeitraum nicht mit einem Versagen der Behälter durch Korrosion zu rechnen.

Beurteilung der HSK

Das grösstmögliche Ausmass der Korrosion in der aeroben Phase kann auf dieselbe Weise bestimmt werden wie beim Stahlbehälter. Hier ist deshalb auch mit einer mittleren Korrosionstiefe von höchstens 0.3 mm zu rechnen. Experimentelle Beobachtungen sprechen gegen eine starke Vertiefung durch Lochfrass (King et al. 2001). Den von der Nagra für die Bestimmung der Dauer des dichten Einschlusses angewendeten Faktor 5 zur Berücksichtigung des Lochfrasses erachtet die HSK als ausreichend konservativ.

Bei der Abschätzung der grösstmöglichen Korrosion bei anaeroben Verhältnissen stützt sich die Nagra auf dieselben Berechnungen wie bei der Abschätzung der durch Sulfid hervorgerufenen Korrosion von Eisen. Es gelten hier deshalb dieselben Vorbehalte und Empfehlungen. Die im Modell von Wersin et al. (1994) berechnete Korrosionsrate ist mit rund $0.008 \mu\text{m/a}$ verhältnismässig klein (vgl. z.B. King et al. 2001).

4.5.2.4 Beitrag der Behälter zur Sicherheit

Die Nagra erwartet, dass der Behälter während etwa 10'000 Jahren einen absoluten Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleistet. Dieser Zeitraum schliesst die Zeit der stark erhöhten Temperatur des Lagernahfeldes ein. Damit ist die entsprechende Anforderung der Richtlinie HSK-R-21 (vollständiger Einschluss in der thermischen Phase) erfüllt. Erst nach Versagen des Behälters kann Wasser in Kontakt mit dem Brennstoff oder dem verglasten

hochaktiven Abfall kommen, wonach die Auflösungsprozesse des Brennstoffs bzw. des Glases anfangen. Nach 10'000 Jahren hat die radiologische Toxizität des abgebrannten Brennstoffs bzw. des HAA-Glases stark abgenommen.

Die Korrosionsprodukte des Behältermaterials Eisen sowie das entstehende Wasserstoffgas tragen zur Bewahrung der reduzierenden Bedingungen im Nahfeld bei. Davon ist insbesondere auch die Auflösungsrate der Uranmatrix abhängig (siehe Abschnitt 4.5.1.1).

Um seine Funktionen zu erfüllen, muss der Behälter am Anfang dicht sein, und er muss unter den chemischen und physikalischen Bedingungen des Tiefenlagers die erforderliche Lebensdauer aufweisen. Gewisse Fragen sind dabei offen, die für den Fall einer Weiterführung des Projekts untersucht werden müssen. Diese Fragen betreffen:

- die Dichtheitskontrolle am beladenen Behälter,
- die mechanische Festigkeit der BE-Behälter insbesondere unter anisotroper Belastung,
- die Auswirkungen der Volumenzunahme bei der Korrosion,
- die Möglichkeit einer stärkeren Sulfidkorrosion.

Der als Alternative betrachtete Kupferbehälter mit Innenbehälter aus Eisen würde voraussichtlich während noch längerer Zeit (mehrere 100'000 Jahre) einen absoluten Einschluss gewährleisten. Dank der geringeren Korrosionsrate, die insbesondere von der Zufuhr von Sulfid abhängt, würde weniger Wasserstoffgas entstehen. Diese Behältervariante wirft hingegen andere Fragen auf, z.B. zur galvanischen Korrosion von Eisen und Kupfer, die es zu klären gäbe.

Die Materialeigenschaften der Stahlbehälter sowie die geeigneten Qualitätsprüfverfahren dürften besser bekannt sein als im Fall des Kupferbehälters. Die Herstellungstechnik und die Materialeigenschaften der Kupferbehälter werden aber heute intensiv untersucht, da solche Behälter für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente in Schweden und Finnland vorgesehen sind.

Nach Ansicht der HSK stellen die offenen Fragen bezüglich Materialeigenschaften und Korrosionsverhalten der Behälter die Machbarkeit der Tiefenlagerung nicht in Frage. Sollte sich im Laufe der weiteren Abklärungen herausstellen, dass bei der Verwendung eines Stahlbehälters der bei der Korrosion entstehende Wasserstoff die Einschlussfähigkeit der Nahfeldbarrieren gefährden könnte, besteht die Möglichkeit, statt dessen den als Alternative beschriebenen Kupferbehälter zu verwenden.

4.5.3 Bentonitverfüllung

4.5.3.1 Generelle Eigenschaften

Bentonit ist ein natürlich vorkommendes Material, das in praktisch allen Endlagerprogrammen als Barrierenmaterial eingesetzt wird. Der verwendete Bentonit wird bergmännisch abgebaut und mechanisch verarbeitet, so dass unterschiedliche Bentonitprodukte entstehen. Bentonit wird wegen seines Quellverhaltens bei Wasseraufsättigung und seinen guten Sorptionseigenschaften eingesetzt, um die Stollengeometrie im Tiefenlager durch den durch Wasserzufuhr erzeugten Quelldruck über lange Zeit zu gewährleisten und die Migration der aus den Behältern austretenden Radionuklide zu verzögern.

Zur Bestimmung der endlagerrelevanten Materialeigenschaften des Bentonits, der in der Form druckverpresster Formelemente (Bentonitblöcke), Bentonitpellets und Bentonitpulvers (NTB 02-05, S. 106) oder gemischt mit anderem Material (z.B. Bentonit/Sand-Gemische) eingesetzt wird, gibt es eine reichhaltige Literatur. Der grösste Datensatz wurde für den Na-reichen Bentonit MX-80 aus Wyoming, USA, erarbeitet. Das Sedimentationsalter dieses Bentonits (mittlere Kreide, 100 Millionen Jahre) weist auf die Langzeitstabilität dieses Materials unter günstigen chemischen und physikalischen Bedingungen hin, wenn z.B. für die in der Natur beobachtete Umwandlung der quellbaren Smektite zu nicht-quellbarem Illit die Kalium-Zufuhr und die notwendigen Temperaturen fehlen (Meunier et al. 1998).

Angaben der Nagra

Als äusserste technische Barriere sieht die Nagra in den Lagerstollen mit BE- und HAA-Behältern eine radial um die Behälter angeordnete Bentonitschicht vor, die rund 0.7 m dick ist. Der Bentonit soll nach den Plänen der Nagra in den BE- und HAA-Stollen in zwei verschiedenen Modifikationen verwendet werden: Als Auflager für die Behälter soll hochdruckverpresster Bentonit in Blöcken verwendet werden. Zur Verfüllung des restlichen Stollenquerschnitts ist Bentonitgranulat, ein Gemisch aus 80 % Bentonitpellets und 20 % Bentonitpulver, vorgesehen. Insgesamt müssen zur Verfüllung der BE/HAA-Stollen mehr als 85'000 m³ Bentonit ins Lager gebracht werden (NTB 02-02, S. 100).

Die Nagra lässt offen, welcher der kommerziell erhältlichen Bentonite im Tiefenlager für das Granulat und die Blöcke verwendet werden soll. Der Na-Bentonit MX-80 wird aufgrund der vielen Daten zu diesem Material und seiner hervorragenden Quellfähigkeit als Referenzbentonit eingesetzt. Die Nagra hat selber eine Reihe von Experimenten in Auftrag gegeben, die am Na-Bentonit MX-80 gemacht worden sind (z.B. NTB 84-18, NTB 85-36, NTB 86-14, NTB 92-06, NTB 01-08). Die Angaben im Sicherheitsbericht zu den physikalischen Eigenschaften orientieren sich daher an einem MX-80-Bentonit, ohne dass die Nagra dessen Verwendung explizit festgelegt hat.

Druckverpresste Bentonitblöcke sind z.B. im Rahmen des FEBEX-Experiments am Grimsel verwendet worden (siehe z.B. Alonso und Alcoverro, 2003). Seitens der Nagra gibt es zur Herstellung dieser Blöcke und zu deren physikalisch-chemischen Eigenschaften nur beschränkte Informationen, genauere Angaben zur Herstellung der Blöcke können aber z.B. aus Johannesson et al. (1995) entnommen werden. Gemäss NTB 02-05 (S. 106) besitzen die vorgesehenen Bentonitblöcke eine Trockendichte von 1.75 Mg m⁻³ und einen Wassergehalt von rund 10 %. Für die Bentonitpellets werden Dichten von 2.10-2.20 Mg m⁻³ und ein Wassergehalt von rund 2 % angegeben, aber nach der Schüttung der Pellets als Granulat im Stollen entstehen Trockendichten unter 1.50 Mg m⁻³ (NTB 92-06). Damit ergibt sich für die radiale Bentonitverfüllung eine durchschnittliche Trockendichte von 1.50 Mg m⁻³. Nach Aufsättigung mit Wasser und Konvergenz des Stollens (von 1.25 auf 1.15 m Radius) erhöht sich die Dichte auf maximal 2.15 Mg m⁻³ (NTB 02-05, S. 131) und es wird ein Quelldruck von 15 MPa erreicht. Dieser Druck entspricht etwa der minimalen horizontalen Hauptspannung und stabilisiert somit den Stollen gegenüber dem Bergdruck. Die Aufsättigung der Bentonitbarriere mit Porenwasser aus dem Opalinuston erfolgt in hundert bis einigen hundert Jahren (NTB 02-05, S. 131). Als Folge der Aufsättigung kommt es zwischen den Blöcken und dem eingeschütteten Granulat zu einer Homogenisierung des Bentonits, so dass ein dichter Ring aus homogenem Bentonit mit einer hydraulischen Leitfähigkeit kleiner als 10⁻¹³ m s⁻¹ und einer durchschnittlichen Porosität von 36 % entsteht.

Die Nagra gibt für den trockenen Bentonit eine homogene thermische Leitfähigkeit von 0.4 W/mK an. Dieser Wert erhöht sich um mehr als das dreifache auf 1.35 W/mK nach der Aufsättigung mit Porenwasser aus dem Opalinuston (NTB 82-06). Unter dem Einfluss der Wärmeproduktion in den BE- und HAA-Behältern müssen die inneren Teile der Bentonitverfüllung Temperaturen bis zu 160°C, die äusseren Ränder der Verfüllung noch Temperaturen bis 95°C aushalten (NTB 02-05, S. 127). In NTB 02-05 (S. 269) wurde daher als konservativer Fall die Möglichkeit besprochen, dass die innere Hälfte der Bentonitverfüllung aufgrund der erhöhten Temperaturen eine Veränderung ihrer Eigenschaften erleidet. Zur thermischen Leitfähigkeit des veränderten Bentonits werden keine Angaben gemacht. Die Nagra geht davon aus, dass die strukturelle Veränderung und Dehydrierung des Bentonits unterhalb von Temperaturen von 125°C vernachlässigbar resp. reversibel, hingegen bei 150°C substantiell sind (Pusch et al. 2002).

Beurteilung der HSK

Der Einbau einer Bentonitbarriere um die eingelagerten Behälter mit abgebrannten Brennelementen oder verglasten hochaktiven Abfällen wird in vielen Ländern als Teil des Lagerkonzepts vorgesehen. In nationalen Endlagerkonzepten mit kristallinem Wirtgestein (z.B. in Schweden und Finnland) kommt der Bentonitbarriere aufgrund der um Grössenordnungen höheren Grundwasserströme eine besondere Bedeutung zu. Im Konzept der Nagra stellt die Bentonitbarriere zunächst eine mechanische Stütze dar, die die BE- und HAA-Abfallbehälter in der Stollenmitte hält (zur Beurteilung, siehe Abschnitt 4.5.3.5) und das Einstürzen der Lagerstollen (und damit das Schaffen ungünstiger Wegsamkeiten) verhindert. Die Bentonitverfüllung begrenzt zudem den Wasserfluss durch das Nahfeld und verzögert den Transport der aus dem Behälter austretenden Radionuklide; diese Funktionen werden auch wesentlich durch das Wirtgestein wahrgenommen.

Die Nagra hat sich nicht auf die Verwendung einer bestimmten Bentonitsorte festgelegt, sondern einen so genannten Referenz-Bentonit (MX-80) eingesetzt, über den aus der Literatur eine beachtliche Datenmenge vorhanden ist. Die HSK ist mit diesem Vorgehen einverstanden, da sich in verschiedenen Experimenten gezeigt hat (z.B. Alonso und Alcoverro 2003), dass die Unterschiede in den physikalischen und chemischen Parametern der einzelnen Bentonite eher gering sind und eine Festlegung zum jetzigen Zeitpunkt daher nur beschränkt relevant ist.

Das von der Nagra gewählte Konzept eines Bentonitsockels aus druckverpressten Bentonitblöcken und einer Stollenfüllung mit Hilfe von Bentonitgranulat (als Mischung aus Pellets und Pulver) ist gegenüber der Lösung, die 1985 für das Projekt Gewähr gewählt wurde (NGB 85-01), neu. Die Nagra sieht für das Einbringen dieser zwei Bentonitsorten wiederum einen dosisarmen ferngesteuerten Betrieb vor (NTB 02-02, S. 93ff). Die Herstellung und das Einbringen eines Bentonitgranulats im Rahmen eines Experiments im Felslabor Mt. Terri ist in Kennedy et al. (2004) beschrieben. Ein geeignetes Vorgehen zum Erreichen gleich bleibender Eigenschaften des Bentonitgranulats (insbesondere Dichte, Wassergehalt und Korngrössenverteilung) bleibt aufzuzeigen. Diese Eigenschaften beeinflussen das thermische Verhalten des Granulats (siehe Abschnitt 4.5.3.2). Sowohl die eingestellte Trockendichte als auch die Schüttdichte im Stollen garantieren schliesslich, dass nach Wasseraufsättigung der Bentonit fähig ist, durch seinen Quelldruck dem Bergdruck entgegen zu wirken und damit die Geometrie der nur sparsam abgestützten Lagerstollen langfristig aufrecht zu halten. Das

hohlraumfreie Einbringen des Bentonitgranulats ist im Falle eines Beibehaltens des gewählten Konzepts bei der Fortsetzung des Projekts in weiteren Grossversuchen zu testen.

Die Nagra geht davon aus, dass das Bentonitgranulat nach Aufsättigung zusammen mit den Bentonitsockeln eine Masse mit homogenen Eigenschaften bilden wird. Diese Annahme bleibt zum jetzigen Zeitpunkt wenig illustriert. Gatabin und Imbert (1995) zeigen Versuche, bei denen durch Aufsättigung relativ homogene Massen entstehen, wohingegen Pusch et al. (2002) darauf hinweisen, dass Bentonitpelletproben nach Wassersättigung auf mikroskopischer Ebene weiterhin Anzeichen für strukturelle Inhomogenitäten aufweisen. Die HSK erwartet daher, dass die Nagra im Falle einer Fortführung des Projekts den Prozess der Homogenisierung weiter untersucht und gegebenenfalls beim Design des Granulats berücksichtigt.

Die Nagra geht im Referenzfall davon aus, dass die Bentonitverfüllung durch die von den Abfallbehältern ausgehende Wärme keine oder nur minimale Veränderungen erfährt. Das alternativ von der Nagra diskutierte Modell mit einer thermischen Degradation der inneren Hälfte der Bentonitverfüllung ergibt sich aus der von der Nagra formulierten Temperaturbeschränkung, dass die Bentonitverfüllung auf mindestens der Hälfte seiner Dicke zu jeder Zeit unterhalb einer Temperatur von 125°C bleibt. Bezüglich der Bentoniteigenschaften bleibt das Modell in mehreren Punkten unklar. Aus Sicht der HSK bleibt genauer abzuklären, inwiefern die um den Behälter über längere Zeiträume herrschenden Temperaturen tatsächlich zu bleibenden Veränderungen des Bentonits führen.

Die HSK weist darauf hin, dass in vielen nationalen Entsorgungsprogrammen eine Maximaltemperatur von 100°C für die Stabilität des Bentonits angenommen wird. Die Nagra betritt hier mit ihrer Grenze von 125°C wenig belegtes Neuland. Literaturdaten zeigen, dass die Dehydrierung (und damit einhergehend die Ausfällung von Kieselsäure, Pusch et al. 2002) bereits bei Temperaturen von ca. 100°C beginnt. Diverse Studien deuten darauf hin, dass Na-Bentonite bereits bei Temperaturen bis 90°C merkliche strukturelle Veränderungen durchlaufen können (z.B. Kawamura et al. 1999) und dass Na-Bentonite generell bei tieferen Temperaturen als Ca-Bentonite entwässern (was sich mit dem Ladungsunterschied zwischen Na und Ca begründen lässt). Bei Einsetzen eines Na-Bentonits als Referenzbentonit wäre jedoch eher die untere Temperaturgrenze bei 100°C relevant, welche gemäss angewandter Argumentation der Nagra zu einer fast vollständigen Entwässerung der Bentonitverfüllung führen müsste. Versuche an Na-Bentonit haben ausserdem gezeigt (Couture 1985), dass bei Temperaturen von 150°C eine merkliche Reduktion des Quellverhaltens auftritt, wenn Bentonit mit Wasserdampf behandelt wird. Bei einer Dehydrierung würde in inneren Partien Wasserdampf produziert und sich vom Kontakt Abfallbehälter-Bentonit ausbreiten, wobei es zu einer Aggregation der Bentoniteile kommt (Madsen 1998).

Ein weiterer Faktor bei der Dehydrierung ist neben der Temperatur auch die Zeitdauer, während der diese Temperatur auf den Bentonit einwirkt. Es muss vermutet werden, dass der Dehydrierungsprozess zeitabhängig ist und während der thermischen Phase einen deutlichen Einfluss auf die Bentonitverfüllung hat.

Das im Fall einer Dehydrierung entstehende Material ist in seinen Eigenschaften nicht charakterisiert worden. Eine dehydrierte und damit volumenreduzierte Bentonitschicht würde jedoch möglicherweise dazu führen, dass die Abfallbehälter aus der Stollenmitte absacken. Hier spielt ausserdem das sich lokal um die Auflageträger und die Deckbleche entwickelnde Temperaturfeld eine Rolle. Aus Sicht der HSK sollte weiter abgeklärt werden, ob die Entwäs-

serung des Bentonits reversibel ist und mit der Aufsättigung durch das eindringende Porenwasser des Wirtgesteins wieder rückgängig gemacht werden kann und welchen Einfluss die Ausfällung der Kieselsäure auf eine solche Re-Hydrierung hat.

Schlussendlich sollte aus Sicht der HSK abgeklärt werden, inwiefern mit der Wahl einer bestimmten Bentonit-Zusammensetzung die Dehydrierung vermindert werden kann. Untersuchungen an Bentoniten verschiedener Zusammensetzung zeigen, dass Ca-Bentonite erst bei höheren Temperaturen dehydrieren als Na-Bentonite.

Die HSK sieht mit dem von der Nagra vorgelegten Konzept einer Bentonitbarriere viele Vorteile für das Tiefenlager verwirklicht. Der Bentonit besitzt viele dem Wirtgestein verwandte Eigenschaften und übernimmt aufgrund seiner Quellfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit wichtige Schutzfunktionen für die inneren und äusseren Barrieren des vorgelegten Lagerkonzepts.

Aus Sicht der HSK sind die folgenden drei Punkte im Rahmen einer Fortführung des Projekts zu beachten:

- Die Nagra sollte die Herstellung und Handhabung der vorgeschlagenen Bentonitmaterialien in Grossversuchen weiter testen.
- Die Nagra sollte die Bentonit-Dehydrierung auf ihre Abhängigkeit von der maximal erreichten Temperatur und der Zeitdauer des thermischen Pulses untersuchen.
- Die Nagra sollte abklären, inwiefern die möglichen Prozesse bei der Dehydrierung reversibel sind und was die Wirkung der damit verbundenen Prozesse auf die Bentonitverfüllung als Sicherheitsbarriere sind.

Diese Punkte sind als Ansatz für zukünftige Überlegungen am Konzept zu verstehen. Die HSK ist mit dem vorgeschlagenen Konzept einverstanden. Die im Fall einer Projektfortführung zu beachtenden Punkte sind aus Sicht der HSK keine Argumente, die die grundsätzliche Machbarkeit des Lagers gefährden.

4.5.3.2 Temperaturbedingungen

Durch die Zerfallswärme der abgebrannten Brennelemente und der hochaktiven Abfälle erhöht sich die Temperatur in der Nähe der Endlagerbehälter und es stellt sich hier und in der weiteren Umgebung der für die Wärmeabfuhr notwendige Temperaturgradient ein. Erhöhte Temperaturen können chemische Prozesse beschleunigen und deren Gleichgewichte verändern. Hohe Temperaturen und hohe Temperaturgradienten in einem mit Wasser nur teilgesättigten Bentonit beeinflussen auch den Wasser- und Wärmetransport und können Veränderungsprozesse (Mineralausscheidungen) auslösen, die ihrerseits das Quellvermögen des Bentonits beeinflussen. Aus diesen Gründen ist es notwendig, den voraussichtlichen Temperaturverlauf im Nahfeld und seine Auswirkungen zu bestimmen.

Angaben der Nagra

Die Nagra beschreibt die Temperaturverteilung und die dafür bestimmenden Parameter in NTB 02-05 (Kap. 5) und NTB 01-04, worin auch auf weitere Quellen verwiesen wird. Das Lager wird so ausgelegt, dass gewisse Temperaturbeschränkungen eingehalten werden (NTB 02-11):

- Der HAA darf keine Temperaturen über 500°C erreichen, damit strukturelle Veränderungen im Glas (Entglasung) nicht eintreten.

- Die BE-Hüllrohre sollen nicht höhere Temperaturen als 350°C erreichen, um Schäden durch Kriechen zu begrenzen.
- Der Bentonit soll auf mindestens der Hälfte seiner Dicke keine Temperatur über 125°C erreichen, damit für das Quellverhalten ungünstige strukturelle Änderungen vermieden werden.

Die Nagra führt Argumente und Berechnungen an, um die Einhaltung dieser Bedingungen bei der gewählten geometrischen Auslegung des Lagers nachzuweisen. Um die (begrenzende) Bedingung bezüglich der Bentonittemperatur einzuhalten, schränkt die Nagra die anfängliche Wärmeleistung der eingelagerten Behälter auf maximal 1500 W ein (Annahmebedingung).

Der Temperaturverlauf im Nahfeld ist abhängig von der

- Zerfallswärme der Abfälle, die mit der Zeit abnimmt,
- Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des Behälters, des Bentonits, des Opalinustons und der angrenzenden geologischen Schichten,
- geometrischen Auslegung des Lagers,
- Ausgangstemperatur aller dieser Materialien, vor allem aber des Opalinustons.

Die Nagra verweist für die Zerfallswärme der HAA und BE auf den Bericht NTB 01-01. Die Berechnungen führt sie für drei Varianten der Behälterbeladung aus, die bezüglich Wärmeleistung für alle anderen Varianten des Referenzfalls (mittlerer Abbrand 48 GWd/t_{SM}) abdeckend sind. Diese Varianten sind:

- HAA-Behälter mit einer HAA-Kokille aus der Wiederaufarbeitung bei BNFL,
- BE (UO₂) –Behälter mit 9 Brennelementen eines Siedewasserreaktors,
- BE (MOX) –Behälter mit 3 UO₂-Brennelementen und 1 MOX-Brennelement eines Druckwasserreaktors.

Durch eine angenommene Abkühlzeit von 40 Jahren (HAA und BE (UO₂)) bzw. 55 Jahren (BE (MOX)) wird sichergestellt, dass die anfängliche Wärmeleistung eines Behälters 1500 W nicht übersteigt.

Die auf das Volumen bezogene Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit des Behältermaterials werden als 3.05 MJ/m³K bzw. 52 W/mK angenommen.

Für Bentonit werden zwei Datensätze der thermischen Parameter verwendet, einer für den trockenen Bentonit (2 % Feuchtegehalt) und einer für den mit Wasser gesättigten Bentonit. Die Dichte des Bentonits wird entsprechend den Verhältnissen im Lager angenommen, die Temperatur wird nicht spezifiziert. Die Angaben für trockenen Bentonit, Wärmekapazität 1.2 MJ/m³K und Wärmeleitfähigkeit 0.4 W/mK, werden durch je drei Literaturangaben gestützt. Die meisten zitierten Stellen betreffen kompaktierte Bentonitblöcke, eine Angabe zur Wärmeleitfähigkeit bezieht sich auf Bentonitgranulat (Volckaert et al. 1996). Die Angaben für den gesättigten Bentonit (Wärmekapazität 2.4 MJ/m³K, Wärmeleitfähigkeit 1.35 W/mK) werden im Wesentlichen auf dieselben Quellen gestützt.

Die thermischen Eigenschaften des Opalinustons werden aus den Beobachtungen in der Bohrung Benken und an den dort gezogenen Bohrkernen hergeleitet (NTB 00-01). Die Wärmekapazität des Opalinustons wurde zu 2.3 MJ/m³K bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeit

wurde in zwei unterschiedlichen Tiefen und richtungsabhängig bestimmt. Im oberen Teil des Opalinustons wurden die Werte 3.2 W/mK horizontal und 1.8 W/mK vertikal gefunden. Im unteren Teil des Opalinustons betrugen die Werte 2.0 W/mK und 1.3 W/mK. Diese Werte des Opalinustons werden auch für die oberen bzw. die unteren Rahmengesteine verwendet. Für die weiteren angrenzenden Schichten wird die gleiche Wärmekapazität sowie ein richtungsunabhängiger Wärmeleitfähigkeitswert von 3.2 W/mK angenommen. Die Nagra hat die Parameterwerte durch eine rechnerische Rekonstruktion der ebenfalls im Bohrloch gemessenen tiefenabhängigen Temperatur überprüft (NTB 01-04).

Die Ausgangstemperatur der unterschiedlichen Materialien wurde aus den Messungen im Bohrloch und aus der Berechnung der Wärmeabgabe eines BE-Behälters durch Wärmestrahlung alleine hergeleitet. Die im Opalinuston in Lagertiefe herrschende Temperatur wurde zu 38°C bestimmt. Die Anfangstemperatur der Behälteroberfläche wurde zu 60°C errechnet.

Die Endlagerbehälter werden in einem Abstand von 3 m in der Achse des Einlagerungstollens (Durchmesser 2.5 m) eingebracht. Der Abstand benachbarter Einlagerungstollen beträgt 40 m. Die Behälter ruhen auf Auflageblöcken aus kompaktiertem Bentonit. Die restlichen Hohlräume sind mit einem Bentonitgranulat gefüllt. Das Granulat hat grobkörnige (80 %) und feinkörnige Bestandteile (NTB 02-05, Kap. 4.5.3). Für die Berechnung der Wärmeausbreitung trifft die Nagra die vereinfachende Annahme, dass der gesamte, den Behälter umgebende Bentonit aus Granulat bestehe, das bezüglich seiner thermischen Eigenschaften homogen sei. Nach der Einlagerung im Stollen verbleibende Metallteile (u.A. Schienen und Auflageträger) werden als unbedeutend vernachlässigt.

Die numerischen Berechnungen sind in NTB 01-04 beschrieben. Der für die Berechnungen gewählte geometrische Ausschnitt entspricht in den horizontalen Ausdehnungen den Symmetrien des Einlagerungsfeldes und erstreckt sich in der vertikalen Richtung über 900 m. Der Finite-Elemente-Ansatz enthält 9000 dreidimensionale Elemente. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen erwartungsgemäss, dass die höchsten Temperaturen an der Oberfläche der BE-Behälter auftreten, wo im Falle des trockenen Bentonits rund 160°C erreicht werden. Bei einem gesättigten Bentonit werden an dieser Stelle 100-110°C erreicht. In der Mitte der Bentonitverfüllung (beim halben Radius), erreichen die Temperaturen rund 110°C bei trockenem Bentonit und 90-100°C bei gesättigten Verhältnissen. Die maximale Temperatur an der Aussenseite der Bentonitverfüllung wird für trockenen Bentonit und BE(MOX)-Behälter errechnet und beträgt rund 95°C.

Aufgrund der Berechnungen folgert die Nagra, dass die Temperaturbeschränkungen eingehalten werden.

Beurteilung der HSK

Die HSK hat die Aussagen der Nagra über das thermische Verhalten der verschiedenen betroffenen Materialien geprüft. Sie hat dabei auch den Einfluss der Vereinfachungen bezüglich der Inhomogenitäten untersucht. Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen der Nagra wurden mit vereinfachten Modellen geprüft.

Auslegungskriterien

Die Auslegungskriterien bezüglich Höchsttemperaturen im Abfallglas und in den BE-Hüllrohren sind nachvollziehbar. Das Kriterium für das Abfallglas wird klar eingehalten. Der

Nachweis der Einhaltung des Kriteriums für die Hüllrohre ist indirekt (Vergleich mit Berechnungen, die für eine andere Wärmeleistung und ein anderes Lagerkonzept ausgeführt wurden). Da die Integrität der Hüllrohre bei den quantitativen Berechnungen des Sicherheitsnachweises konservativerweise nicht vorausgesetzt wird, sieht die HSK den Entsorgungsnachweis deswegen nicht in Frage gestellt. Ein intaktes Hüllrohr bildet aber eine wertvolle zusätzliche Barriere. Die HSK erwartet deshalb bei einer allfälligen Weiterentwicklung des Projektes einen direkt nachvollziehbaren Nachweis für die Einhaltung der Grenztemperatur von 350°C am Brennelement.

Das Auslegungskriterium der maximalen Temperatur im Bentonit erweist sich als das entscheidende Temperaturkriterium. Es hat dadurch auch direkten Einfluss auf die Annahmekriterien für die Brennelemente zur Einlagerung (Begrenzung der Wärmeleistung).

Die Nagra betritt mit der hohen Grenztemperatur des Bentonits von 125°C Neuland (siehe Beurteilung der generellen Bentonit-Eigenschaften im vorangehenden Abschnitt 4.5.3.1). Diese Grenztemperatur soll auch nur im äusseren Teil (äussere Hälfte des Durchmessers) der Bentonitverfüllung eingehalten werden, während die Temperaturen im inneren Teil vorübergehend höhere Werte erreichen dürfen. Um der Ungewissheit über die Prozesse, die bei hohen Temperaturen und Temperaturgradienten im Bentonit ablaufen, aus dem Wege zu gehen, wurde in anderen Projekten, die eine Bentonitverfüllung vorsehen, die Temperatur bisher auf maximal 100°C begrenzt (SKB 2004; JNC 2000; ONDRAF/NIRAS 2001). Die Feststellung der Nagra, dass unterhalb 125°C keine nachteiligen Veränderungen in der Bentonitverfüllung zu befürchten seien, stützt sich nach Ansicht der HSK auf eine relativ schmale Datenbasis. Die einzige in NTB 02-05 referenzierte Beobachtung an einem Bentonitgranulat (Pusch et al. 2002) betrifft die Einwirkung von Wasserdampf über den Zeitraum von einem Monat, wo bei den Temperaturen von 110°C und 125°C keine nachteiligen Veränderungen des Quellverhaltens beobachtet wurden, hingegen ein deutlicher Einfluss bei einer Temperatur von 150°C. Die genaue Temperatur- und Zeitabhängigkeit sowie die eingehende Klärung der Veränderungsprozesse im Bentonit bleiben noch offen.

Thermische Parameter

Die Nagra zitiert für die auf das Volumen bezogene Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit des Behältermaterials ($3.05 \text{ MJ/m}^3\text{K}$, bzw. 52 W/mK) den Bericht NTB 97-02, der aber keine weiteren Herkunftsangaben enthält. Die thermischen Parameter des Behältermaterials beeinflussen allerdings (im Gegensatz zur vom Behälter abgegebenen Wärmeleistung) die Ergebnisse der thermischen Berechnung im Bentonit wenig. Die angegebenen Parameterwerte sind für Eisen plausibel und werden nicht näher geprüft. Zur Bestimmung der Anfangstemperatur der Behälteroberfläche (60°C) hat die Nagra als Wärmeverlust lediglich den Beitrag der Wärmestrahlung betrachtet. Dabei hat sie die (geringen) Geometrie- und Emissivitätskorrekturen für die Rückstrahlung aus der Umgebung vernachlässigt. Der Wärmeverlust durch Wärmeleitung und Konvektion wurde in der Berechnung nicht berücksichtigt. Die errechnete Anfangstemperatur der Behälteroberfläche dürfte deshalb zu hoch ausgefallen sein. Die Anfangstemperatur des Behälters beeinflusst den Temperaturverlauf in der Umgebung wenig, sollte aber im Rahmen der Auslegung für die Betriebsphase genauer bestimmt werden.

Die thermischen Eigenschaften des Bentonits sind von seiner Verdichtung (Trockendichte), seinem Wassergehalt und der Temperatur abhängig. Grundsätzlich ist die Wärmeleitfähigkeit auch von der Struktur des Materials abhängig (Granulat).

Zur Begründung der gewählten Werte der Wärmekapazität des Bentonits hat die Nagra Vergleichswerte aus der Literatur angeführt. Bei der Überprüfung fällt auf, dass die Zahlenwerte dabei nicht immer vollständig auf die Verhältnisse im vorliegenden Projekt umgerechnet wurden. Insbesondere betrifft das die Korrektur auf die anfänglich geringe Trockendichte des Bentonits von 1.5 Mg/m^3 und den geringen Feuchtegehalt von 2 %. So ergibt sich z.B. statt des zitierten Wertes des japanischen H12-Projekts von $1.14 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ (der bei 1.8 Mg/m^3 und 6 % Feuchtegehalt gilt) nach der Umrechnung der tiefere Wert $0.6 \text{ MJ/m}^3\text{K}$, der mit dem von der Nagra verwendeten Wert von $1.2 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ zu vergleichen wäre. Eine tiefere Wärmekapazität würde die maximal erreichten Temperaturen im angrenzenden Wirtgesteinsbereich leicht erhöhen.

Die meisten zitierten Werte der Wärmeleitfähigkeit beziehen sich auf einen homogenen kompaktierten Bentonit. Allgemein erwartet man von einem trockenen Granulat eine geringere Wärmeleitfähigkeit als vom entsprechenden homogenen Material (Farouki, 1981). Die vorliegenden, für Granulat erhobenen Daten weisen zwar auf eine Wärmeleitfähigkeit hin, die nicht tiefer ist als $0.4 \text{ W/m}^3\text{K}$. Allerdings ist zu bedenken, dass die Experimente mit einem Bentonit mit anfänglich 3 % Feuchtegehalt und einer leicht höheren Trockendichte als im vorliegenden Fall ausgeführt wurden. Die Umrechnung auf die Verhältnisse beim vorliegenden Projekt würde etwas tiefere Wärmeleitfähigkeiten als $0.4 \text{ W/m}^3\text{K}$ als möglich erscheinen lassen. Wärmeleitfähigkeitswerte von $0.3 \text{ W/m}^3\text{K}$ werden z.B. in Börgesson und Hernelind (1999) für Bentonit unter ähnlichen Bedingungen angegeben. Die Folge einer tieferen Wärmeleitfähigkeit wäre eine höhere Temperatur in der Bentonitverfüllung, vor allem im inneren Teil. Eine vereinfachte Modellberechnung der HSK lässt auf eine Erhöhung um rund 10°C beim halben Radius der Bentonitverfüllung schliessen. Die Temperaturerhöhung am Behälter ist höher, während am Aussenrand des Bentonits erwartungsgemäss keine nennenswerte Temperaturerhöhung erfolgt.

Mit der Aufnahme von Wasser im Laufe der Aufsättigung des Nahfeldes erhöhen sich die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität des Bentonits. Da der zeitliche Verlauf der Aufsättigung noch nicht gut abgeklärt ist, hat die Nagra die beiden Extreme des immer trockenen und des von Anfang an aufgesättigten Bentonits berechnet. Diesem Vorgehen kann die HSK zustimmen. Die Temperaturabhängigkeit der thermischen Parameter wird von der Nagra nicht angesprochen. Aufgrund der Literaturodaten geht auch die HSK von einer nur geringen Abhängigkeit aus, die im Rahmen des erwähnten Vorgehens vernachlässigt werden kann.

In der Anfangsphase, in der die Aufsättigung nicht weit fortgeschritten ist, besteht ausser der Granulierung auch eine weitere Inhomogenität, nämlich die Auflager der Behälter, die aus kompaktierten Bentonitblöcken bestehen. Diese Blöcke haben einen Feuchtegehalt von 10 % und eine Trockendichte von 1.75 Mg/m^3 . Ihre Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität sind deshalb deutlich höher als diejenigen der übrigen Verfüllung. Das hat zur Folge, dass ein überdurchschnittlicher Anteil der Wärme durch die Auflager abgeleitet wird, und der Bodenbereich der Stollenwand eine leicht erhöhte Temperatur hat im Vergleich zu den übrigen Stollenwandbereichen.

Die Annahmen zu den thermischen Eigenschaften des Opalinustons beruhen auf Messungen aus unterschiedlicher Tiefe in der Bohrung Benken. Für die Wärmeleitfähigkeit wurden Proben aus nur zwei Tiefenlagen herangezogen. Unter Mitberücksichtigung der mineralogischen Beschreibung der Bohrkerne schloss die Nagra auf das Vorliegen eines oberen Bereichs und eines unteren Bereichs des Opalinustons, die aufgrund unterschiedlichen Quarzgehalts unterschiedliche thermische Leitfähigkeiten haben sollen. Die thermischen Eigenschaften werden unverändert auch für die jeweiligen unteren und oberen Rahmengesteine angenommen. Für die weiter aussen angrenzenden Gesteinsschichten werden NTB 01-04 unter Berufung auf den Untersuchungsbericht zur Bohrung Benken (NTB 00-01) thermische Parameterwerte angegeben, die aber im zitierten Bericht nicht vorhanden sind. Auch wenn diese thermischen Parameter plausibel sind, sollten sie experimentell erhärtet sein, denn die Eigenschaften dieser weiteren angrenzenden Schichten beeinflussen die maximale Erwärmung des Opalinustons. Auch für den Opalinuston selber sowie für die Rahmengesteine sollte die Datenbasis erweitert werden, um die Annahmen besser zu stützen. Die experimentellen Daten können im Falle der Realisierung eines Tiefenlagerprojekts im Opalinuston im Rahmen weiterer Sondierungen erhoben werden.

Thermische Berechnungen

Die HSK hat die thermischen Berechnungen in NTB 01-04 nicht im Detail nachvollzogen. Sie hat aber durch eine vereinfachte Modellierung die Plausibilität der Ergebnisse getestet und die in NTB 01-04 enthaltene Testberechnung der Nagra geprüft. Die Testberechnung der Nagra konnte zwar verifiziert werden, ihre Aussagekraft muss aber relativiert werden, da der Wärmequellterm darin zu stark verändert wurde. Die Nagra hat ein Dokument vorgelegt (Mayer et al. 2005), in denen sie weitere Testberechnungen mit zwei unabhängigen Rechenmodellen beschreibt. Eines dieser Modelle bietet eine vergleichbare Modelliergenauigkeit wie das ursprüngliche Rechenmodell. Die Berechnungen in NTB 01-04 konnten durch die Testberechnungen bestätigt werden.

Die Konsequenzen einer leichten Unterschätzung der Temperatur im Bentonit für die Freisetzung der Radionuklide durch das ganze Barrierensystem wären nicht gravierend. Dies zeigen Berechnungen der HSK (vgl. Abschnitt 4.11.4), bei denen eine bis auf die letzten 10 cm reduzierte Bentonitbarriere angenommen wurde. Auch in diesem Fall wurde die Einhaltung der Schutzziele nachgewiesen.

Wie oben erläutert, haben die Auflageblöcke eine höhere Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität als das Bentonitgranulat. Deshalb muss grundsätzlich mit einer stärkeren Erwärmung des unmittelbar unter dem Lagerstollen liegenden Bereichs des Opalinustons gerechnet werden, als die Nagra in ihrem Modell errechnet. Die HSK hat in einer vereinfachten Modellberechnung mit konservativ gewählten Parametern das Ausmass dieser Temperaturerhöhung untersucht. Die Ergebnisse lassen auf eine nur geringe Erhöhung von wenigen Grad schliessen.

Folgerungen

Nach Ansicht der HSK bestehen bezüglich der thermischen Eigenschaften der Bentonitverfüllung und der geologischen Gesteinsschichten noch Ungewissheiten, die verringert werden sollten. Auch sieht die HSK einen Bedarf für weitere Untersuchungen, um die langfristige Be-

ständigkeit der Bentonitverfüllung im Tiefenlager auch bei Temperaturen deutlich über 100°C nachweisen zu können.

Die maximalen Temperaturen sowohl im Bentonit wie auch im Opalinuston sind für die Schlussfolgerungen bezüglich der langfristigen Beständigkeit dieser Barrieren wichtig. Es ist aber prinzipiell machbar, dass die Temperaturen im Nahfeld geringer bleiben, als sie jetzt im Projekt errechnet werden. Die Behälter könnten mit weniger Brennelementen beladen werden, was allerdings den Platzbedarf für das Lager vergrößert. Die Brennelemente könnten vor der Tiefenlagerung länger zwischengelagert werden, um ihre Wärmeproduktion zu verringern. Der Bentonit könnte mit Zusatzstoffen (Graphit, Quarz) vermischt werden, welche die Wärmeleitfähigkeit verbessern und so zu tieferen Temperaturen führen. Bei Veränderung des Bentonits durch Additive sind allerdings auch die weiteren Anforderungen an den Bentonit zu berücksichtigen, wie die ausreichende Quellfähigkeit und es ist insbesondere sicherzustellen, dass der Durchbruch von Gas aus der Korrosion der Behälter (siehe Abschnitt 4.5.3.4) in reversibler Weise geschieht (nachträgliche Verheilung der Gaspfade im Bentonit).

Aufgrund der vorliegenden Analysen ist die HSK der Ansicht, dass die Tiefenlagerung im Opalinuston durch die vorhandenen Ungewissheiten bezüglich der Zuverlässigkeit des Temperaturkriteriums nicht grundsätzlich in Frage gestellt ist. Die HSK empfiehlt der Nagra hingegen, im Falle der Weiterführung des Tiefenlagerprojektes im Opalinuston die experimentellen Grundlagen für die thermischen Parameter zu erweitern und die thermische Modellierung zu verfeinern.

4.5.3.3 Aufsättigung und Quellverhalten

Angaben der Nagra

Die Nagra beschreibt die Aufsättigung des Nahfeldes hauptsächlich in NTB 02-03 und darin zitierten Berichten. Das Quellverhalten des Bentonits wird in NTB 02-05 und darin zitierten Berichten beschrieben.

Aufsättigung

In den offenen Stollen herrscht mit rund 0.1 MPa ein deutlicher Unterdruck gegenüber dem Porenwasserdruck des ungestörten Wirtgesteins, der in der Umgebung des Lagers rund 6.5 MPa beträgt. Im Laufe der Zeit breitet sich deshalb eine Drucksenke in der Umgebung der Stollen aus, die in unmittelbarer Stollennähe auch zu einer Untersättigung des Opalinustons führt. Die Ausbildung einer solchen Drucksenke ist im Felslabor Mont Terri und in anderen Untertagebauwerken in Tonformationen beobachtet worden und kann rechnerisch nachvollzogen werden.

Die Aufsättigung des Lagnahfeldes nach Verfüllung der Stollen ist hingegen ein komplizierter Vorgang, der in der Natur nicht beobachtet werden konnte. Bei diesem Vorgang muss nicht nur der den Stollen umgebende Wirtgesteinsbereich durch zufließendes Wasser eine Druckerhöhung erlangen, sondern auch die in die Stollen eingebrachte Bentonitverfüllung. Diese ist poröser als das Wirtgestein, wird unter atmosphärischem Druck eingebracht und ist anfänglich nicht mit Wasser gesättigt. Das zu verfüllende Porenvolumen ist deshalb im Vergleich zu den Wassermengen, welche zur Auffüllung der Drucksenke im Opalinuston not-

wendig sind, weit grösser. Der Ablauf der Aufsättigung unterliegt zudem verschiedenen Einflüssen, die durch die Nahfeldmaterialien bestimmt werden:

- Die Porosität des Bentonits von rund 45 % beruht auf vielen kleinen Poren. Die kleine Porengrösse im Bentonit hat zur Folge, dass dort Kapillarkräfte durch ihre Saugwirkung („negativer Druck“) den Druckgradienten erhöhen und die Aufsättigung beschleunigen.
- Die Aufwärmung der Lagerumgebung führt einerseits durch die Erhöhung der Viskosität des Wassers zu höherer hydraulischer Durchlässigkeit aller Materialien, andererseits werden durch die unterschiedliche Wärmeausdehnung des Gesteins und des Wassers Überdrücke erzeugt, die auf die Aufsättigung beschleunigend wirken. Die anfänglich hohe Temperatur in der Nähe des Endlagerbehälters verursacht die Verlagerung von Bentonitporenwasser weg vom Behälter (Börgesson und Hernelind 1999).
- Der erhöhte Gasdruck durch Wasserstoff aus der anaeroben Korrosion des Eisens verzögert den Wasserzufluss zum Stollen.

Die Nagra hat den zeitlichen Ablauf der Aufsättigung mit zwei unterschiedlichen Rechenmodellen untersucht. Eine zweidimensionale Zweiphasenflussrechnung (Poppei et al. 2002) befasst sich mit der Aufsättigung des Einlagerungsstollens im Bereich eines Lagerbehälters mit und ohne Wärmefreisetzung und Gasdruck. Ohne Erwärmung und Gasdruck wird eine Aufsättigungsdauer von rund 400 Jahren errechnet. Der Wert ist vom spezifischen Speicherkoeffizienten abhängig, der hier als $3.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ angesetzt wird. Die Berücksichtigung der Erwärmung beschleunigt den Aufsättigungsprozess, der in diesem Fall nach etwa 100-200 Jahren abgeschlossen ist (ohne Gasdruck). Die Dauer und das Ausmass der Aufsättigung sind aber auch von den Annahmen zur Gasproduktion abhängig. Bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Erwärmung und der Gasbildung durch Korrosion ist die Verzögerung gegenüber dem ohne Gasdruck und Erwärmung berechneten Fall insgesamt allerdings eher gering (Poppei et al. 2002).

Eine dreidimensionale Berechnung mit einem grundsätzlich für isotherme gesättigte Verhältnisse anwendbaren Modell (Kuhlmann und Marschall 2002) erlaubt der Nagra, Schlüsse zu ziehen über die zeitliche und räumliche Abhängigkeit der Aufsättigung des unterirdischen Bauwerkes. Die speziellen Eigenschaften des Bentonits (Kapillareffekte), die zu einer beschleunigten Aufsättigung beitragen können, sind in dieser Modellierung nicht berücksichtigt. Auch in diesem Fall errechnet die Nagra für die BE/HAA-Lagerstollen eine Aufsättigungszeit von rund 400 Jahren.

Quellverhalten

Der Bentonit dehnt sich bei Wasseraufnahme aus bzw. entwickelt einen Quelldruck, falls die Ausdehnung nicht möglich ist. Voll gesättigt und homogenisiert würde der in den BE/HAA-Lagerstollen eingebrachte Bentonit einen Quelldruck von 2 bis 4 MPa ausüben, entsprechend seiner Trockendichte von 1.5 Mg/m^3 (Porosität 0.45). Gleichzeitig mit der Aufsättigung des Bentonits und des angrenzenden Opalinustons findet aber wegen der Verformbarkeit des Opalinustons eine Reduktion des Stollendurchmessers statt (Konvergenz), die erst dann aufgehalten wird, wenn der zusammengedrückte Bentonit den nötigen Gegendruck von rund 15 MPa aufbringt. Dieser Quelldruck wird bei einer Trockendichte des Bentonits von 1.77 Mg/m^3 (Porosität 0.36) ausgeübt, was einem konvergierten Stollendurchmesser von 2.3 m statt ursprünglich 2.5 m entspricht. Mit der Dichte und der Porosität

ändert sich als Folge der Konvergenz der Stollenwände auch die Durchlässigkeit des Bentonits für Wasser und Gas.

Der Bentonit wird als Granulat, bestehend aus einer Mischung von hochverdichteten Bentonitpellets und Bentonitpulver, in den Lagerstollen eingebracht. Gemäss Nagra (NTB 02-05, Kap. 5.3.3) beginnt das Quellen der Bentonitpellets, wenn der Sättigungsgrad des Granulats etwa 50 % erreicht hat. Nach vollständiger Aufsättigung entsteht rasch eine homogene Struktur (NTB 02-05, gestützt auf Pusch et al. (2002) sowie Dereeper und Volckaert (1999)).

Beurteilung der HSK

Aufsättigung

Wegen der gleichzeitig ablaufenden und sich gegenseitig beeinflussenden hydraulischen, mechanischen, thermischen und chemischen Prozesse ist die Berechnung der Aufsättigung des Bentonits mit einigem Aufwand verbunden. Die von der Nagra vorgelegten Berechnungen müssen, ihrer Vereinfachungen wegen, als vorläufig aufgefasst werden. Die Berechnungen von Poppei et al. (2002) zeigen in qualitativer Weise den Einfluss der Erwärmung des Wirtgesteins auf die Aufsättigung, mit und ohne zusätzlichem, im Stollen erzeugtem Gasdruck. Ein analoger Wärmeeffekt wurde z.B. von Barnel et al. (2005) errechnet.

Der von Poppei et al. (2002) verwendete Parametersatz ist nicht ganz konsistent, da z.B. die thermischen Parameter (insbesondere die Wärmeleitfähigkeit) des Bentonits nicht als dem Wassergehalt entsprechend variabel angenommen sind. Da ein hoher Wert der Wärmeleitfähigkeit verwendet wurde (entsprechend gesättigtem Bentonit), wurden die im Bentonit entstehenden Temperaturen bei dieser Untersuchung unterschätzt. Die höchsten Temperaturwerte, nahe der Behälteroberfläche, bleiben deshalb unterhalb rund 125°C.

Die Angaben zum Wert des spezifischen Speicherkoeffizienten von Opalinuston sind ebenfalls unklar. Statt des Referenzwertes von $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ wurde bei einem Teil der Berechnungen ein tieferer Wert von $3.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ angenommen. Da die Dauer der Aufsättigung als mit wachsendem Speicherkoeffizienten abnehmend errechnet wurde, wäre das Ergebnis ohne diese Änderung in Richtung einer rascheren Aufsättigung beeinflusst.

Die Gasbildungsraten in den BE/HAA-Lagerstollen wurden um einen Faktor 30 höher angesetzt, als aufgrund der Angaben des Sicherheitsberichts zur Behälterkorrosion angemessen gewesen wäre. Eine weitere Überschätzung des zu erwartenden Gasdrucks ergibt sich daraus, dass bei der Berechnung der Verbrauch von Wasser bei der Korrosion nicht berücksichtigt wurde. Unter Berücksichtigung dieser Wasserzehrung würden geringere Druckwerte errechnet. Die Nagra hat der HSK eine ergänzende Modellrechnung vorgelegt (Marshall et al. 2005), welche den Einfluss der Wasserzehrung illustriert.

Die Verwendung des Referenzwertes des spezifischen Speicherkoeffizienten und die Korrektur der Gasdruckwerte würden die Ergebnisse der Berechnungen dahingehend ändern, dass die Aufsättigung innert 100 Jahren stattfinden würde. Die Modellierung der Aufsättigung berücksichtigt aber nicht das gleichzeitig mit der Aufsättigung stattfindende Quellen des Bentonits (mit Modifikation des Saugpotentials). Berechnungen, wie z.B. die von Barnel et al. (2005), zeigen eine Verzögerung der Aufsättigung, wenn das Quellen des Bentonits berücksichtigt wird.

Die Berechnung von thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozessen ist heute weitgehend möglich (siehe z.B. Alonso und Alcoverro (2005) bezüglich Modellvalidierungen).

Um den Zeitrahmen der Aufsättigung und insbesondere die im Nahfeld entstehenden Temperaturen und Gasdrücke besser zu bestimmen, empfiehlt die HSK der Nagra, im Falle der Fortführung des Tiefenlagerprojektes der Kopplung der massgebenden Prozesse erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken.

Quellverhalten

Das Quellverhalten von Bentonitgranulat weist gegenüber dem von Bentonitpulver gewisse Eigenheiten auf. Gemäss Pusch et al. (2002) ist, zumindest für die Beobachtungsdauer von einigen Monaten, der Quelldruck vom Bentonitgranulat um einen Faktor zwei bis drei höher als derjenige vom homogenen Bentonitpulver mit derselben Trockendichte. Auch ist die hydraulische Leitfähigkeit vom Bentonitgranulat um eine Grössenordnung höher als vom Bentonitpulver. Die Autoren führen diese Unterschiede auf eine unvollständige Homogenisierung des Granulats zurück, was auch durch mikroskopische Aufnahmen bestätigt wird. Die Abweichungen sind aber weit weniger ausgeprägt, wenn die Aufsättigung des Granulats bei einer höheren Temperatur erfolgt (65°C). Wegen der zu erwartenden Lebensdauer der Behälter geht die HSK davon aus, dass eine vollständige Homogenisierung des Bentonitgranulats stattgefunden hat, bevor mit der Migration von Radionukliden im Bentonit gerechnet werden muss.

Das Bentonitgranulat hat einen anfänglichen Sättigungsgrad von 6 - 7 %. Wegen der starken Erwärmung ist zunächst mit einer Abnahme des Wassergehalts in der Nähe des Lagerbehälters zu rechnen. Deshalb, und auch weil insbesondere bei Endlagerbehältern mit MOX-Brennelementen die Aufsättigung bei noch hoher Temperatur fortgeschritten sein könnte, ist mit Wasserdampf im inneren Teil der Bentonitverfüllung zu rechnen. Der Einfluss von Wasserdampf auf quellfähige Tone ist in mehreren Publikationen beschrieben worden, einschliesslich dem von der Nagra zitierten Bericht (Pusch et al. 2002), der sich auf Granulat bezieht. Der Kontakt des Granulats mit Wasserdampf führt zu einer Abnahme der Quellfähigkeit, die auf Zementierung durch das Ausfällen von Silikaten zurückgeführt wird. Gemäss dem zitierten Bericht ist die Abnahme nach Wasserdampfkontakt bei 150°C ausgeprägt. Wenn die Temperatur bei 110°C und 125°C gehalten wurde, entspricht die Quellfähigkeit derjenigen von Bentonitpulver und ist somit kleiner als diejenige eines bei einer Temperatur von 65°C oder weniger aufgesättigten Bentonitgranulats.

Eine Beeinträchtigung der Quellfähigkeit von Bentonit durch das Ausfällen von Mineralen wurde hauptsächlich in teilgesättigtem Bentonit mit einem Temperaturgradienten beobachtet. Der Vorgang ereignet sich auch dann, wenn die Temperaturen unterhalb 100°C liegen (Karnland und Pusch 1995). Die ortsabhängige Ausscheidung von Mineralen wird aber auch bei gesättigten Verhältnissen erwartet, sobald ein Temperaturgradient besteht (Karnland und Pusch 1995; Arcos et al. 2000). Nach Einschätzung der HSK ist es noch unklar, wie die mögliche Zementierung das sich einstellende Gleichgewicht zwischen Quelldruck und Stollenkonvergenz beeinflussen wird. Die HSK empfiehlt der Nagra, im Falle der Weiterführung des Projektes diese offene Frage und die allfälligen Konsequenzen für den Zustand (z.B. Durchlässigkeit) des unmittelbar an den Stollen angrenzenden Wirtgesteinsbereiches zu klären.

4.5.3.4 Gastransport durch die Bentonitverfüllung

Die anaerobe Korrosion des Abfallbehälters (Produktion von H_2) und, zu einem kleineren Teil, die Radiolyse von Wasser nach Behälterversagen erzeugen Wasserstoffgas im Bereich der BE/HAA-Lagerstollen. Mit dem Versagen der Behälter (im Referenzfall der Nagra nach 10'000 Jahren) tritt ausserdem radioaktives ^{14}C (in Form von CH_4 oder CO_2) hinzu. Die geringe Gasdurchlässigkeit der Bentonitverfüllung und des Opalinustons behindert das Entweichen des Gases, was zu einem Druckaufbau um den Behälter führt. Ist genügend Druck aufgebaut, beginnt das Gas sich auszubreiten und muss dabei als erste Barriere die Bentonitverfüllung überwinden. Im Zusammenhang mit dem von der Nagra betrachteten Zeitraum für das Lager stellt sich die Frage, ob dieser Gastransport die Integrität der Bentonitverfüllung einerseits und des Wirtgesteins andererseits gefährden könnte. Der Gastransport sollte die Bentonitverfüllung und ihre Eigenschaften so wenig wie möglich beeinträchtigen.

Angaben der Nagra

Bis zur vollständigen Korrosion aller BE- und HAA-Behälter (nach ca. 200'000 Jahren, NTB 04-06, S. 26) rechnet die Nagra mit einer totalen Gasproduktion von $4 \cdot 10^7 m^3$ (STP, d.h. Gasvolumen bei Standarddruck- und -temperaturbedingungen) aus den BE- und HAA-Lagerstollen. Diese Gasproduktion führt zu einem Druckaufbau innerhalb der Lagerstollen, wenn die Gasproduktionsrate schneller ist als der Gastransfer (und die damit verbundene Druckentlastung) durch den Bentonit, das Wirtgestein und die versiegelten Zugänge. Die Nagra geht bei ihrer Betrachtung vom Fall der bereits erfolgten Aufsättigung des Bentonits bei Beginn der Gasbildung aus (NTB 02-05, S. 131).

Das vor allem entstehende H_2 -Gas löst sich anfänglich im Porenwasser des Bentonits, bis die Gassättigungskonzentration erreicht wird, und wird vorerst durch Diffusion abtransportiert. Diffusion als Transportprozess ist aber allein ungenügend, um das entstehende Gas abzuführen (NTB 85-36). Es baut sich deshalb ein Gasdruck im Inneren der Bentonitverfüllung auf. Bei genügend hohem Druck werden andere Transportmechanismen einsetzen, um das Gas aus der Bentonitverfüllung abzuführen. Die bei höherem Druck einsetzenden Transportmechanismen von Gas im Bentonit sind noch nicht geklärt (NTB 04-06). Es liegt aber eine grosse Anzahl von Laborstudien zum Gastransport vor (NTB 02-05, S. 132), die empirisch erlauben, quantitative Aussagen zum Transport und zu den wichtigsten Parametern zu machen.

Ein Minimaldruck (Schwelldruck) ist nötig, um neben der Diffusion effektivere Transportprozesse zu initialisieren (NTB 04-06). Laborstudien zeigen, dass die Schwelldrücke für solche Transportprozesse etwa der Summe von Quelldruck und hydrostatischem Druck entsprechen (NTB 85-36; Tanai et al. 1997; Horseman et al. 1999). Die Nagra schliesst daraus, dass das sich durch Behälterkorrosion ansammelnde Gas durch lokale Durchbrüche durch den Bentonit abgeführt wird. Die entstehenden Gasfliesswege („Pfade hoher Gasdurchlässigkeit“, NTB 85-36) sind in Kapillargrösse (mit Durchmessern kleiner als $1 \mu m$, NTB 02-05, S. 132) und schliessen sich mit dem Abbau des Überdrucks unmittelbar wieder. Dabei verbleiben keine dauerhaften Wegsamkeiten für einen späteren Radionuklidtransport (Swift et al. 2001).

Aufgrund der Eigenschaften des Bentonits (vgl. Abschnitt 4.5.3.1) und der durchgeführten Experimente (Harrington und Horseman 2003) zieht die Nagra den Schluss, dass unabhän-

gig vom Transportmechanismus die Gasflüsse durch den Bentonit genügend sind, um das entstehende Gas in das Wirtgestein abzuführen, ohne die Barriere des Bentonits zu beschädigen. Dabei nimmt der Bentonit kaum selber Gas auf. Auch die Menge des beim Gasdurchbruch ausgetriebenen Wassers ist untergeordnet.

Beurteilung der HSK

Bestimmend für den am Behälter entstehenden Gasdruck sind gemäss Berechnungen der Nagra einerseits die Geschwindigkeit der Korrosionsprozesse und andererseits die Wirksamkeit der unterschiedlichen Gasmigrationsprozesse, die das Entweichen des Wasserstoffgases durch den Bentonit erlauben.

Sobald einmal eine hinreichende Aufsättigung des Nahfeldes stattgefunden hat, ist die Korrosionsrate nicht mehr vom Wasserangebot abhängig. Die Nagra (Marschall et al. 2005) hat aufgezeigt, dass auch bei hohen H_2 –Partialdrücken am Behälter infolge der kapillaren Saugwirkung des Bentonits das Wasser nicht in der Masse aus den Poren verdrängt werden kann, dass eine für die Korrosion ungenügende Luftfeuchtigkeit vorhanden wäre. Die Gasproduktion erfolgt deshalb entsprechend der für anaerobe Korrosion bei ausreichendem Wasserangebot anwendbaren Korrosionsrate (siehe Abschnitt 4.5.2.2). Kurzfristige Änderungen in der Gasproduktion sind aus Sicht der HSK nur dann zu erwarten, wenn einzelne Behälter versagen und damit unmittelbar auch das gesamte Behälterinnere für korrodierendes Wasser erreichbar wird. Hier kann kurzfristig und lokal mit einer Korrosionszunahme bis zu einem Faktor 2 gerechnet werden. Dieser Prozess wurde von der Nagra nicht berücksichtigt, ist aber über das ganze Lager hinweg vernachlässigbar, da das Versagen der Behälter nicht in einem engen Zeitfenster gleichzeitig stattfinden wird.

Die Transportprozesse in kompaktiertem und aufgesättigtem Bentonit werden von der Nagra schwächer als für den Opalinuston belegt, auch wenn die von der Nagra vorgelegten Studien und die zitierte Literatur übereinstimmend darauf hinweisen, dass der Bentonit die produzierten Gasmengen an das Wirtgestein weitergeben kann, ohne dass sich durch Überdruck Risse ausbilden würden, die über längere Zeiträume erhalten bleiben und die Funktionalität der Bentonitbarriere beeinträchtigen würden. Die fehlende Kenntnis der dabei tatsächlich stattfindenden Prozesse und die z.T. widersprüchlichen Angaben in der Literatur (z.B. Harrington und Horseman 2003) führen zu einer Ungewissheit darüber, welche Faktoren diese Prozesse beeinflussen, inwiefern die von der Nagra gemachten Aussagen zum Gastransport durch den Bentonit tatsächlich konservativ sind und wie der empirisch abgeleitete Gasfluss bei ändernden Umgebungsbedingungen anzupassen wäre.

Die Betrachtungen der Nagra zur Gasproduktion setzen einen mit Wasser aufgesättigten Bentonit voraus. Im Vergleich zu teilgesättigten Verhältnissen ist dabei mit einem schnelleren Druckanstieg zu rechnen. Die HSK hat gegen diese Betrachtungsweise nichts einzuwenden. Realistischerweise ist, durch die Luftfeuchtigkeit ausgelöst, lange vor der vollständigen Aufsättigung und Homogenisierung des Bentonits mit Korrosion und somit Gasproduktion zu rechnen. Der nicht aufgesättigte Bentonit ist für Gas relativ durchlässig, auch wenn sich in der Nähe der Behälteroberfläche durch Umwandlungsreaktionen kieselige Krusten bilden könnten, die die Permeabilität reduzieren würden.

Das entstehende Gas wird durch lokale Durchbrüche durch den Bentonit abgeführt. Die Nagra geht davon aus, dass die entstehenden Gasfliesswege sich dank der Ausheilungseigenschaften des Bentonits mit dem Abbau des Überdrucks unmittelbar wieder schliessen.

Entlang der lokalen Durchbruchwege können aber mikrostrukturelle Veränderungen und Gasblasen verbleiben, die möglicherweise für spätere Gasdurchbrüche und für die Radionuklidmigration bevorzugte Wegsamkeiten darstellen.

In NTB 02-05 (S. 269) wurde im Zusammenhang mit der Radionuklidmigration der konservative Fall besprochen, dass die Hälfte der Bentonithülle durch die hohen Temperaturen der BE-Behälter thermisch degradiert wird (Entwässerung der Smektitstruktur und Ausfällung von Mineralen). Die Konsequenzen dieses Falls für die Problematik des Gastransportes wurden hingegen von der Nagra nicht diskutiert. Möglich wäre, dass die bei erhöhten Temperaturen vorkommende Ausfällung von Kieselsäure (Pusch et al. 2002) zu lokalen Verkrustungen führt, die den Gastransport beeinflussen und zu einem spröden Verhalten vom Bentonit führen können. Bekannt ist (Couture 1985), dass der Kontakt mit Wasserdampf die Quellbarkeit des Bentonits reduzieren kann. Diese Effekte sind wegen der von der Nagra ermittelten hohen Temperaturen und Temperaturgradienten an der Behälter-Bentonit-Grenze sorgfältig zu prüfen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Nagra wenig neue Erkenntnisse zur Gasmigration im Bentonit vorlegt. Für den Bentonit verbleiben die Untersuchungen teilweise auf einer phänomenologischen Stufe, so dass die den Gastransport im Bentonit beeinflussenden Faktoren nur schlecht abschätzbar sind. Die HSK erwartet, dass die Nagra im Falle einer Fortsetzung des Projektes weiterführende Experimente zum Gastransport im Bentonit durchführt und dabei auch die Bedeutung einer partiellen thermischen Degradation des Bentonits für den Gastransport untersucht. Da der Gastransfer durch den Bentonit aufgrund der vorliegenden experimentellen Daten unter weitgehender Verheilung der dabei geöffneten Kanäle stattfindet und da das Problem der thermischen Degradation grundsätzlich durch modifizierte Behälterbeladungen umgangen werden kann, sieht die HSK die hier angesprochenen Aspekte nicht als fundamentale Probleme an, die den Entsorgungsnachweis in Frage stellen.

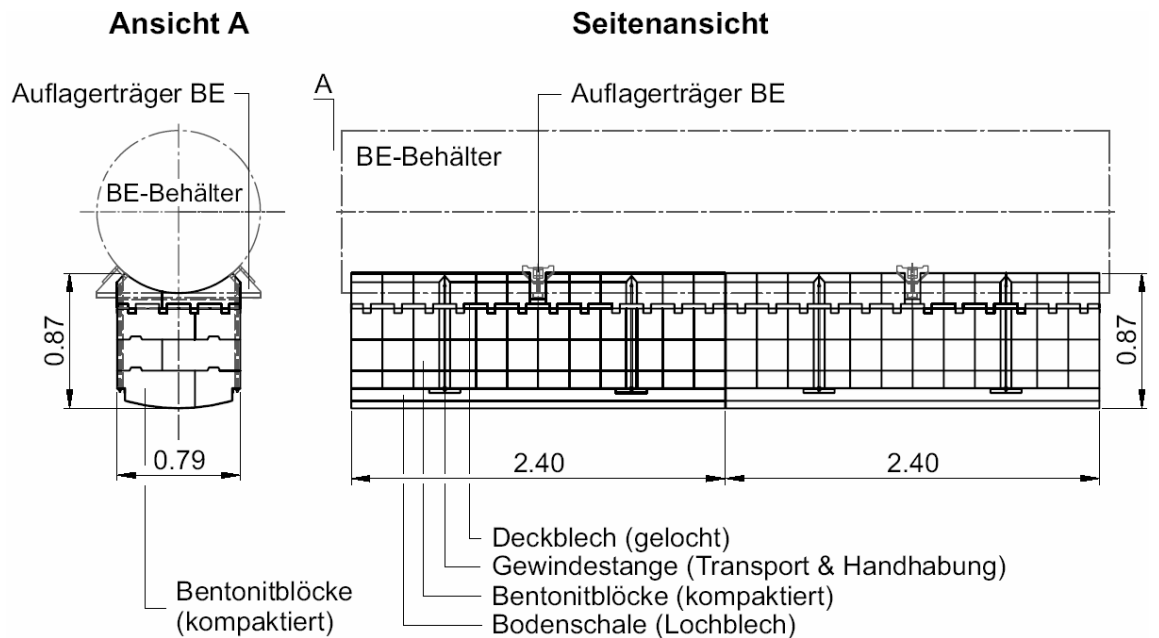
4.5.3.5 Tragfähigkeit

Die Bentonitbarriere erfüllt ihre Barrierenaufgaben nur dann optimal, wenn die Abfallbehälter in den Lagerstollen in einer zentralen Position gehalten werden. Der Bentonit muss daher das Gewicht des eingelagerten Behälters (BE-Behälter: ~26 t, HAA-Behälter: ~9 t, NTB 02-05, S. 102 und 104) tragen können, ohne dass der Behälter langfristig auf die Stollensohle absinkt und dadurch ein Kurzschluss zwischen dem Behälter und dem Umgebungsgestein entstehen würde.

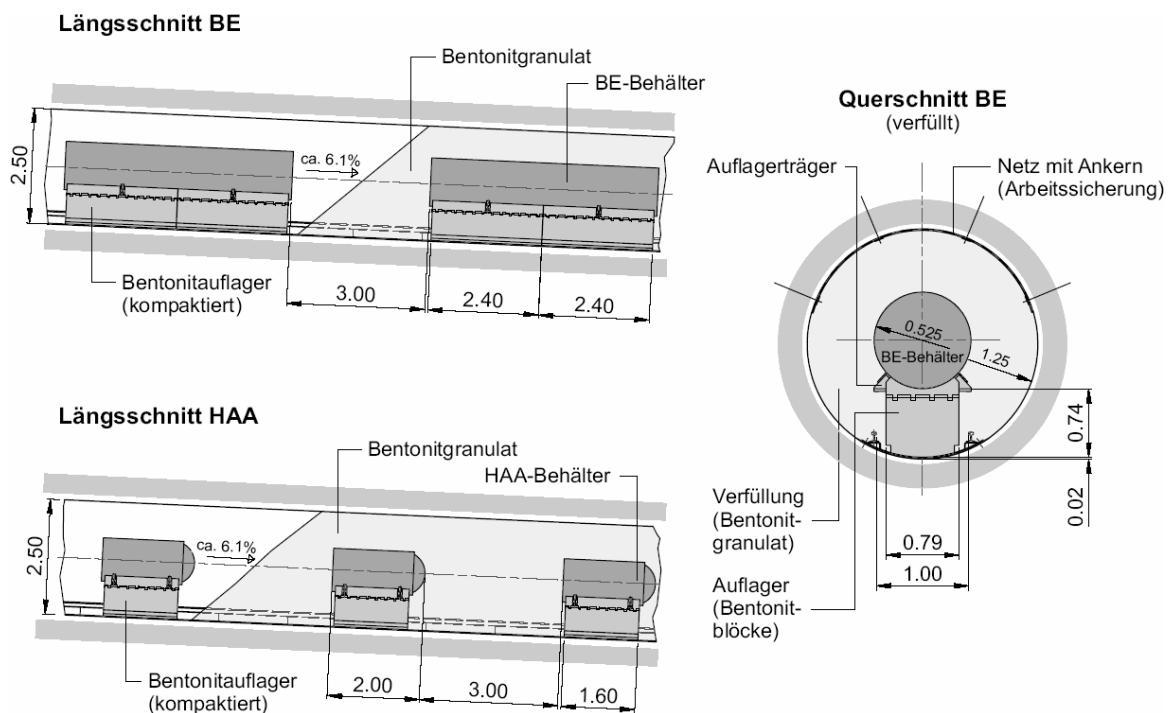
Angaben der Nagra

Die in der Stollenmitte gelagerten Behälter stehen auf einem Sockel aus gepressten Bentonitblöcken und Eisenelementen. Der Sockel aus Bentonitblöcken, das so genannte Bentonitauflager (Fig. 4.5-1), besteht aus einer der Stollensohle angepassten gekrümmten Bodenschale aus abgekantetem Lochblech, auf der mehrere Reihen von gegenseitig verzahnten kompaktierten Bentonitblöcken lagern. Darüber folgt ein planes und ebenfalls gelochtes Deckblech. Darüber folgt eine weitere Schicht kompaktierter Bentonitblöcke, die in der Längsachse des Bentonitsockels eine dem Lagerbehälter angepasste Vertiefung aufweisen. Die oberste Bentonitblockschicht wird von zwei Auflageträgern aus Stahl unterbrochen, die quer zur Behälterachse auf dem Deckblech liegen und das Gewicht des Behälters bis zum

Moment der Einlagerung im Stollen tragen. Zur Einlagerung eines BE-Behälters sind zwei Bentonitauflager (Länge: 2.4 m, mit je einem Auflagerträger) notwendig, für die Einlagerung eines HAA-Behälters ein Bentonitauflager (Länge 1.6 m, mit zwei Auflagerträgern). Nach der Einlagerung bleiben die Auflagerträger vor Ort (das Behältergewicht ruht dann jedoch auf der obersten Bentonitblocklage) und die Stollen werden mit Bentonitgranulat verfüllt (Fig. 4.5-2).



Figur 4.5-1: Geometrie der Bentonitauflager für die BE-Behälter (aus NTB 02-02).



Figur 4.5-2: Schematische Darstellung der Einlagerung von BE/HAA-Behältern in den Lagerstollen (aus NTB 02-02).

Bezüglich der Rheologie der Bentonitblöcke verweist die Nagra (NTB 02-05, S. 132) auf eine Studie aus Schweden (Pusch und Adey 1999), in der gezeigt wird, dass das Absinken des Behälters als Folge von Kompaktion und Kriechen des Bentonits auch nach einer Million Jahren sehr beschränkt bleibt, d.h. in der Grössenordnung von 1 cm liegt.

Beurteilung der HSK

Die Beurteilung der HSK bezieht sich insbesondere auf die von der Nagra gewählte Geometrie und Materialzusammensetzung des Auflagers und an einem Vergleich zwischen den Angaben der Nagra und den Angaben in der Studie von Pusch und Adey (1999). Die Herleitung des Modells in Pusch und Adey (1999) orientiert sich an einzelnen submikroskopischen Teilchen. Die an diesen Teilchen wirkenden Kräfte werden als Bindungskräfte von Wasserstoffbrücken identifiziert und nehmen damit Bezug auf den in dieser Studie betrachteten wassergesättigten Zustand des Bentonits. Die Bindungskräfte in einem nicht aufgesättigten Bentonit werden nicht betrachtet.

Für die im Entsorgungsnachweis gegebene Situation eines Wirtgesteins mit stark reduziertem Wasserfluss und einer zu Beginn trockenen Bentonitverfüllung geht die HSK davon aus, dass die höchsten Temperaturen, verursacht durch die Zerfallswärme aus den Behältern, im Bentonit in den ersten 100 Jahren nach der Einlagerung erreicht werden, d.h. bevor die Bentonitbarriere mit Wasser aufgesättigt ist. Die aus der Studie von Pusch und Adey (1999) gezogenen Schlüsse, die von einem bereits gesättigten Bentonit ausgehen, können in dieser ersten Phase nicht auf die Situation im betrachteten Tiefenlager übertragen werden. Ein Vergleich mit den in Pusch und Adey (1999) vorausgesetzten Verhältnisse ist erst in einer zweiten Phase mit vollständiger Aufsättigung der Bentonithülle gegeben. Das rheologische Verhalten des nicht aufgesättigten Bentonits ist von der Nagra nicht dokumentiert worden. Eine Argumentation, ob dieser Unterschied zu höherer oder reduzierter Absenkung des Behälters führt, ist daher nicht vorhanden und auch in der Literatur nicht diskutiert.

Für die Absenkung der Behälter in der Zeit vollständiger Bentonitaufsättigung sind die Angaben in der Literatur hingegen recht einheitlich. So sind die Resultate aus Pusch und Adey (1999) kompatibel mit einer ähnlichen Studie aus Japan (JNC 2000), aus der sich für den gleichen Zeitraum von einer Million Jahren (und ein ähnliches Behältergewicht) eine Absenkung kleiner als 5 mm ergibt. Für die HSK ist damit die Tragfähigkeit der Bentonitbarriere ausreichend gegeben. Die HSK schliesst sich aber der Schlussfolgerung aus JNC (2000) an, mit der auf die Notwendigkeit hingewiesen wird, die heute vorhandenen Modelle zur Behälterabsenkung in Zukunft weiterzuentwickeln, um die tatsächlich ablaufenden Prozesse im Lagerstollen noch besser abzubilden. Dabei ist insbesondere auch der Einfluss der Temperatur zu berücksichtigen, die in den Kriechprozessen eine wichtige Rolle spielt.

4.5.3.6 Chemische Bedingungen

Die chemische Zusammensetzung des Porenwassers und die chemischen Eigenschaften der Bentonitoberflächen sind von zentraler Bedeutung für die Mobilität der Radionuklide im Nahfeld. Die Porenwasserchemie bestimmt massgeblich die Speziation der chemischen Elemente, d.h. die Verteilung eines Elements auf seine verschiedenen chemischen Formen. Zusammen mit der Kenntnis der Stabilität relevanter Festphasen lässt sich die maximale Konzentration des Elements im Nahfeld – auch Löslichkeitslimite genannt – berechnen. Für die

Sorption von Bedeutung sind zusätzlich die chemische Beschaffenheit und die Reaktivität der Bentonitoberflächen. Sind die für die Sorption eines Elements verantwortlichen chemischen Mechanismen bekannt, lassen sich sowohl die Auswirkungen von Parameterschwankungen auf die Sorption berechnen, als auch Sorptionskoeffizienten, die nicht unter Referenzbedingungen gemessen wurden, auf diese extrapolieren.

Zu den chemischen Kerngrößen gehören der pH-Wert (Säuregrad) und der Eh-Wert (Redoxpotenzial, Eh ist die Potenzialdifferenz zur Standardwasserstoffelektrode), aber auch die Konzentrationen von Wasserinhaltsstoffen wie Karbonat, die als Komplexbildner wirken und die Speziation und damit die Löslichkeit und Sorption beeinflussen können.

Angaben der Nagra

Das Vorgehen der Nagra bei der Herleitung der Zusammensetzung des Bentonit-Porenwassers ist in NTB 02-09 ausführlich dargelegt. Die Nagra verwendete ein quantitatives Modell, um die chemischen Vorgänge bei der Aufsättigung des Bentonits mit Grundwasser aus dem Opalinuston zu berechnen. Dabei wurden die folgenden bekannten Wechselwirkungen zwischen Bentonit und den Wasserinhaltsstoffen berücksichtigt: Ionenaustausch mit Na^+ , K^+ , H^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} und Sr^{2+} an den Oberflächen mit konstanter Ladung, Protonierung und Deprotonierung an den Oberflächen mit variabler Ladung, Komplexierungsreaktionen in Lösung, Gasaustausch (CO_2), Gleichgewichte mit Kalzit, Gips, Quarz und Kaolinit, sowie Auflösung von NaCl. Die Schwierigkeit bei der Herleitung des CO_2 -Partialdrucks für das Porenwasser des Opalinustons (siehe Abschnitt 4.7.2) und die daraus resultierende Unsicherheit wirkt sich direkt auf die Zusammensetzung des Bentonitwassers aus, hauptsächlich auf den pH-Wert, das Redoxpotenzial und die Karbonatkonzentration. Diese Unsicherheit berücksichtigte die Nagra, indem sie neben dem Referenz-Bentonitwasser (pH = 7.25) ein Bentonitwasser mit „tiefem pH“ (pH = 6.90) und eines mit „hohem pH“ (pH = 7.89) definierte, siehe Tabelle 4.5-2.

Bei der Herleitung der maximalen Löslichkeiten und der Sorptionskoeffizienten für die Radionuklide wurde jeweils die ganze Spannbreite der Wasserzusammensetzung berücksichtigt. Das Redoxpotenzial (Eh-Wert) wurde unter Berücksichtigung verschiedenster möglicher redox-aktiver Spezies hergeleitet (NTB 02-13). Es wurde angenommen, dass der Eh-Wert im Nahfeld durch Eisenphasen bestimmt wird, die aus der Korrosion der Stahlbehälter stammen. Für den Referenzwert wurde von einem Gleichgewicht zwischen Magnetit und der Eisen(II)-Konzentration im Nahfeldwasser ausgegangen, was zu einem Eh-Wert von -193 mV führte. Die Spannbreite des Eh-Werts wurde mit den Eckwerten -127 mV und -282 mV, die sich aus der Spannbreite des pH-Werts ergeben, angegeben.

Nach dem Verschluss des Tiefenlagers herrschen von der Betriebsphase her oxidierende Bedingungen vor. Die Nagra geht davon aus, dass der vorhandene Sauerstoff nach der Aufsättigung des Bentonits mit Grundwasser rasch aufgebraucht sein wird, entweder durch Oxidation von Eisen, mikrobielle Vorgänge oder durch die Reaktion mit Pyrit, der im Bentonit vorhanden ist. Für die Abschätzung der Evolution des Bentonitwassers verwendete die Nagra zwei einfache Modelle, ein Mischtankmodell und ein Diffusions/Reaktions-Modell. Beide Modelle führten zu übereinstimmenden Resultaten: Wegen der chemischen Ähnlichkeiten von Opalinuston und Bentonit bleibt die Zusammensetzung des Porenwassers im Bentonit auch unter dem Einfluss von Opalinuston-Grundwasser stabil.

Tabelle 4.5-2: Chemische Zusammensetzung des Porenwassers im Bentonit. Die aus Unsicherheiten in $p(\text{CO}_2)$ stammenden Bandbreiten der Erwartungswerte sind in den Kolonnen Bentonitwasser „tiefer pH“ respektive Bentonitwasser „hoher pH“ aufgeführt. Die Konzentrationen sind in $[\text{mol dm}^{-3}]$ angegeben.

	Referenz-Bentonitwasser	Bentonitwasser „tiefer pH“	Bentonitwasser „hoher pH“
pH	7.25	6.90	7.89
Eh [mV]	−193	−127	−282
$\log p(\text{CO}_2)/\text{bar}$	−2.2	−1.5	−3.5
Ionenstärke $[\text{eq dm}^{-3}]$	0.323	0.365	0.263
CO_3	$2.83 \cdot 10^{-3}$	$6.99 \cdot 10^{-3}$	$5.86 \cdot 10^{-4}$
Na	$2.74 \cdot 10^{-1}$	$2.91 \cdot 10^{-1}$	$2.49 \cdot 10^{-1}$
Ca	$1.32 \cdot 10^{-2}$	$1.33 \cdot 10^{-2}$	$1.34 \cdot 10^{-2}$
Mg	$7.64 \cdot 10^{-3}$	$8.91 \cdot 10^{-3}$	$6.15 \cdot 10^{-3}$
K	$1.55 \cdot 10^{-3}$	$1.67 \cdot 10^{-3}$	$1.38 \cdot 10^{-3}$
Sr ⁽¹⁾	$1.90 \cdot 10^{-5}$	$3.68 \cdot 10^{-5}$	$2.92 \cdot 10^{-6}$
SO_4	$6.16 \cdot 10^{-2}$	$6.39 \cdot 10^{-2}$	$5.59 \cdot 10^{-2}$
Cl	$1.66 \cdot 10^{-1}$	$2.06 \cdot 10^{-1}$	$8.61 \cdot 10^{-2}$
Fe	$4.33 \cdot 10^{-5}$	$7.74 \cdot 10^{-5}$	$8.00 \cdot 10^{-6}$
Al	$1.92 \cdot 10^{-8}$	$1.53 \cdot 10^{-8}$	$7.55 \cdot 10^{-8}$
Si	$1.80 \cdot 10^{-4}$	$1.80 \cdot 10^{-4}$	$1.84 \cdot 10^{-4}$

⁽¹⁾ Die Sr-Konzentration ist in Tabelle 5.3-2 des Sicherheitsberichts der Nagra (NTB 02-05) nicht enthalten, wurde von der Nagra jedoch hergeleitet und verwendet (NTB 02-09).

Mineralogische Veränderungen im Laufe der Zeit, die das Quellverhalten des Bentonits beeinflussen können, wie Ionenaustausch von Na durch Ca, Illitisierung, Bildung von Eisensilikaten, Einfluss der Temperatur, erachtet die Nagra aufgrund verschiedener Untersuchungen in der Literatur als vernachlässigbar.

Beurteilung der HSK

Das von der Nagra verwendete Modell für die chemische Zusammensetzung des Bentonit-Porenwassers berücksichtigt die wesentlichen Wechselwirkungen zwischen den reaktiven Bentonitbestandteilen und der wässrigen Phase. Die Zusammensetzung des Referenz-Bentonitwassers und ihre Variationsbreite sind nachvollziehbar und plausibel. Die als Konsequenz der Unsicherheiten im Partialdruck von CO_2 und in der Karbonatkonzentration sich ergebenden Variationen im pH-Wert und Eh-Wert haben einen signifikanten Einfluss auf die Sorptionskoeffizienten und maximalen Löslichkeiten vieler Radionuklide. Dieser Einfluss wurde von der Nagra quantitativ berücksichtigt.

Die Herleitung des Referenz-Eh-Wertes für das Nahfeld durch die Nagra ist in NTB 02-13 sehr detailliert dargelegt. Der Eh-Wert ist von Bedeutung für die Speziation von

Radionukliden, die verschiedene Oxidationszustände einnehmen und damit je nach Redoxpotenzial sehr unterschiedliche Mobilitäten haben können. Die Wahl des Eisenminerals Magnetit und der Lösungsspezies Fe^{2+} als Eh-bestimmendes Redoxpaar ist nachvollziehbar. Die Nagra betrachtet diese Wahl als realistischen Kompromiss zwischen zahlreichen alternativen Möglichkeiten. Magnetit bildet sich bei der Korrosion der Stahlbehälter unter reduzierenden Bedingungen und kommt im Bentonit nicht oder höchstens in Spuren vor. Er wird also in jenen Bereichen des Nahfelds vorliegen, die sich in unmittelbarer Nähe zu den Stahlbehältern befinden. Dies sind dieselben Bereiche, in denen bei den Ausbreitungsrechnungen die maximalen Löslichkeiten in erster Linie zur Anwendung kommen. Die Sorptionskoeffizienten kommen hingegen im gesamten Nahfeld zur Anwendung. Es stellt sich daher die Frage, ob die Wahl von Magnetit als Eh-bestimmende Festphase auch für die Sorptionsdaten korrekt ist. Dazu ist zu bemerken, dass die durch die Variation im Partialdruck von CO_2 resultierende Eh-Spanne auch Eh-Werte abdeckt, die in Gegenwart anderer Eisenphasen zu erwarten wären. Da auch im Opalinuston reduzierende Bedingungen vorherrschen, erachtet es die HSK als vertretbar, den von der Nagra gewählten Referenz-Eh-Wert mit seinem Variationsbereich für das gesamte Nahfeld als relevant anzusehen und auch für die Herleitung der Sorptionskoeffizienten im Nahfeld zu verwenden.

Die Annahme, dass die anfänglich oxidierende Umgebung nach dem Verschluss des Lagers rasch reduzierend wird, ist vernünftig. Die oxidierenden Bedingungen entstehen durch den Eintrag von Luftsauerstoff während der Betriebsphase. Nach Verschluss jedes Lagerstollens und schliesslich des ganzen Lagers werden sich wegen der grossen reduzierenden Kapazität des Nahfelds (Stahlbehälter) und des Opalinustons (Pyrit, Siderit) wieder reduzierende Bedingungen einstellen.

Für die Berechnung der Zusammensetzung des Referenz-Bentonitwassers standen der Nagra Gleichgewichtsdaten aus der Literatur zur Verfügung, die für 25°C gelten. Die Wasserzusammensetzung in Tabelle 4.5-2 gilt daher ebenfalls für eine Temperatur von 25°C . Die Temperatur des Wirtgesteins liegt hingegen bei 38°C . Zur Zeit des Behälterversagens (10'000 Jahre nach Verschluss des Lagers) wird die Temperatur im Nahfeld, verursacht durch die Wärmeproduktion der Abfälle, noch bei etwa 50°C liegen. Diese Temperaturdifferenzen werden erfahrungsgemäss keinen entscheidenden Einfluss auf die Porenwasserchemie haben. Für den Fall eines frühen Behälterversagens bei Nahfeldtemperaturen bis zu 90°C (die minimale Auslegungs-Lebensdauer des Behälters beträgt 1'000 Jahre) ist jedoch ein signifikanter Temperatureffekt nicht auszuschliessen. Im Falle der Fortführung des Projekts wäre dieser Aspekt abzuklären.

4.5.3.7 Löslichkeiten der Radionuklide

Viele Radionuklide, die nach der Korrosion des Stahlbehälters aus der Abfallmatrix freigesetzt werden, sind nur in sehr beschränktem Ausmass im Porenwasser des Nahfelds löslich. Ihre Löslichkeit hängt von der Wasserzusammensetzung ab, sowie von der Stabilität der Festphase, die sich unter den vorherrschenden chemischen Bedingungen bilden wird. Falls durch die Korrosion der Abfallmatrix mehr Radionuklide in Lösung gelangen, als durch das Nahfeld weg diffundieren können, wird sich die Konzentration der Radionuklide in diesem Grenzbereich kontinuierlich erhöhen, bis die maximale Löslichkeit erreicht ist. Die Ausfällung

einer Festphase verhindert einen weiteren Anstieg der Lösungskonzentration. Die Migration der Radionuklide durch das Nahfeld kann dadurch stark verzögert werden.

Die Abschätzung der maximalen Löslichkeiten der Radionuklide erfolgt im Allgemeinen durch Gleichgewichtsberechnungen unter Verwendung thermodynamischer Daten und der chemischen Zusammensetzung des entsprechenden Porenwassers. Aus solchen Berechnungen geht hervor, welche Festphase unter den gegebenen Bedingungen am stabilsten ist. Ob sie ausfallen kann, hängt jedoch auch von kinetischen Faktoren ab. Es ist bekannt, dass sich insbesondere Festphasen mit komplexer Zusammensetzung nicht durch Ausfällung aus übersättigten Lösungen bilden.

Angaben der Nagra

Für die maximalen Löslichkeiten im Nahfeld des BE/HAA-Lagers hat die Nagra für jedes Element vier Werte definiert: einen Referenzwert mit oberem und unterem Grenzwert (*Upper Limit* und *Lower Limit*) für den Variationsbereich, sowie einen Wert für oxidierende Bedingungen. Die Herleitung der Daten erfolgte im PSI und ist im Bericht NTB 02-10 ausführlich dokumentiert. Die für die Berechnung der Löslichkeitslimiten verwendeten thermodynamischen Daten stammen aus einer eigens für diesen Zweck entwickelten Datenbank (NTB 02-16). Die Daten bauen auf der international anerkannten Datenbank der OECD/NEA auf (Mompéán und Wanner 2003), die für die Anwendung im Entsorgungsnachweis am PSI entsprechend erweitert wurde. Die Erweiterung betrifft Elemente, die im NEA-TDB Projekt bis jetzt nicht berücksichtigt worden sind. Die Herleitung der Daten aus der Literatur ist in NTB 02-16 im Detail beschrieben.

Als löslichkeitsbestimmende Festphasen wurden in den Fällen von Be, Zr, Nb, Mo, Tc, Pd, Sn, Th, U, Np und Pu die Metalloxide oder -hydroxide verwendet, in den Fällen von Ni, den Lanthaniden (Sm, Eu, Ho), Pb und Am die Metallkarbonate oder -hydroxykarbonate. Die Daten für die Lanthaniden stützen sich auf Rechnungen für Eu und wurden unverändert für Sm und Ho verwendet. Eu selbst wurde in der Liste nicht aufgeführt, weil es nicht sicherheitsrelevant ist. Für Ac und Cm wurde Am als Analogon gewählt. In Lösung dominieren gemäss den Modellrechnungen des PSI bei Be, Zr, Nb, Tc, Pd, Sn, Th, U, Np sowie Pb und den Lanthaniden Hydroxo- und Karbonatkomplexe. Im Falle von Mo dominiert das Anion MoO_4^{2-} und bei Ni das nicht komplexierte Ion Ni^{2+} . Bei Am dominiert der Silikatkomplex $\text{AmSiO}(\text{OH})_3^{2+}$, der erst kürzlich identifiziert wurde und auch in der neuesten Version der NEA-TDB Datenbank (Guillaumont et al. 2003) enthalten ist. Dieser Komplex wurde in Betrachtung einer Analogie auch für Pu(III) verwendet und dominiert gemäss den Berechnungen des PSI hier ebenfalls. Der analoge Komplex $\text{EuSiO}(\text{OH})_3^{2+}$ wurde ebenfalls kürzlich experimentell bestätigt. Wegen der im Vergleich zum Am-Komplex leicht geringeren Stabilität dominiert er nur im Bentonitwasser „hoher pH“, d.h. bei tieferem $p(\text{CO}_2)$ -Wert (Tabelle 4.5-2). Bei allen dreiwertigen Actiniden (Ac, Pu, Am, Cm) und Lanthaniden sind neben dem neuen Silikatkomplex jedoch auch die Karbonat- und Sulfatkomplexe von Bedeutung.

Die von der Nagra verwendeten Werte sind in Tabelle 4.5-3 aufgelistet. Für H, C_{org} (organischer Kohlenstoff), Cl, I, Cs und Po legte die Nagra keine Löslichkeitslimiten fest.

Die Konzentrationen von C_{inorg} (anorganischer Kohlenstoff, liegt als Karbonat vor), Ca und Sr sind durch die Zusammensetzung des Porenwassers (Tabelle 4.5-2) gegeben. Bei Se und Ag ergaben sich jeweils die elementaren Formen als stabile Festphasen, was im Falle von Ag zu einer sehr tiefen Löslichkeit führen würde. Die Nagra hat für Ag konservativerweise

AgCl(s) als Löslichkeitsbestimmende Festphase gewählt. Für Pa wurde die maximale Löslichkeit wegen Datenmangels anhand eines Vergleichs mit anderen Actiniden grob abgeschätzt.

Für Radium verwendete die Nagra nicht ein herkömmliches Löslichkeitsmodell, sondern nahm an, es assoziiere sich im Nahfeld mit anderen, in grösseren Mengen vorhandenen Festphasen. Aufgrund von Erkenntnissen aus der Literatur ging die Nagra von einer festen Mischphase (*solid solution*) von RaSO_4 und im Bentonit enthaltenem BaSO_4 aus. Dabei wurde angenommen, dass sich das gesamte Ra-Inventar über die langen Zeiträume über den Bentonit verteilen und mit dem im Bentonit vorhandenen BaSO_4 zu einer Mischphase verbinden wird. Die maximale Konzentration von Ra ergab sich aus dem Löslichkeitsprodukt von reinem RaSO_4 und dem molekularen Anteil von Ra in der Mischphase.

Die Nagra hat die mögliche Reduktion von Sulfat zu Sulfid unter den reduzierenden Bedingungen des Nahfelds konservativerweise nicht berücksichtigt. Dadurch könnten sich im Fall von Ag und Pb Metallsulfide bilden, die zum Teil sehr schwer löslich sind und die maximalen Konzentrationen wesentlich reduzieren würden.

Im Rahmen eines „*what if case*“ hat die Nagra den Einfluss einer hypothetischen Redoxfront im Nahfeld, verursacht durch Radiolyse und Bildung oxidierender Spezies, grob abgeschätzt. Für die entsprechenden Modellrechnungen wurde das Referenz-Bentonitporenwasser (Tabelle 4.5-2) unverändert verwendet, der Eh-Wert wurde jedoch auf +635 mV erhöht, was einem Gleichgewicht zwischen Magnetit und der löslichsten Form von $\text{Fe}(\text{OH})_3$ entspricht. Unter diesen Bedingungen resultierten in den Berechnungen der Nagra für Se, Tc, U, Np und Pu höhere maximale Löslichkeiten im Vergleich zum Referenzfall. Im Fall von Se und Tc hob die Nagra die Löslichkeitslimiten ganz auf, weil die leicht löslichen, stabilen Anionen SeO_4^{2-} und TcO_4^- gebildet werden. Im Fall von U und Np erfolgt eine Oxidation zu U(VI) resp. Np(V), was die Löslichkeit wesentlich erhöht. Bei Pu ändert die Löslichkeit nur wenig, weil immer noch Pu(IV)-Oxid die stabile Festphase ist und Pu in Lösung bei +635 mV erst teilweise zu Pu(V) oxidiert ist. Für Pa verwendete die Nagra den für oxidierende Bedingungen angepassten Wert für Np(V). Für die restlichen Elemente fand die Nagra bei +635 mV keine Abweichung von der Löslichkeit im Referenz-Bentonitwasser.

Beurteilung der HSK

Die HSK hat für jedes Element den Referenzwert, den oberen Grenzwert und den Wert für oxidierende Bedingungen überprüft (HSK 35/80). Die unteren Grenzwerte wurden von der Nagra für die probabilistischen Analysen benötigt und sind von der HSK nicht überprüft worden, da sie weniger sicherheitsrelevant sind. In Tabelle 4.5-3 sind die von der HSK verwendeten maximalen Löslichkeiten aufgelistet und den Werten der Nagra gegenübergestellt.

Die Herleitung und Selektion der maximalen Löslichkeiten ist in allen Fällen nachvollziehbar und in den meisten Fällen plausibel. Die HSK hat keine Einwände zu den meisten von der Nagra verwendeten maximalen Löslichkeiten anzubringen, mit den nachfolgend erwähnten Ausnahmen.

Tabelle 4.5-3: Maximale Löslichkeiten [mol dm^{-3}] im Referenz-Bentonitwasser (Nahfeld BE/HAA). Die chemische Zusammensetzung des Porenwassers ist in Tabelle 4.5-2 aufgeführt. Als *Upper Limit* wird der pessimistische obere Grenzwert für die maximale Löslichkeit bezeichnet. Die Bezeichnung „hoch“ bedeutet, dass eine unlimitierte Löslichkeit angenommen wird. HSK-Werte, die von den Nagra-Werten abweichen, sind **fett gedruckt**.

Element	Referenzwert Nagra	Referenzwert HSK	<i>Upper Limit</i> Nagra	<i>Upper Limit</i> HSK	Oxidierende Bedingungen ⁽¹⁾
H	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Be	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	hoch	hoch	$1 \cdot 10^{-6}$
C _{inorg}	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
C _{org}	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Cl	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Ca	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Ni	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Se	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	hoch
Sr	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$ ⁽²⁾
Zr	$2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$
Nb	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Mo	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Tc	$4 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	hoch
Pd	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Ag	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$
Sn	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-8}$
I	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Cs	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Sm	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Ho	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Pb	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Po	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Ra	$2 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-11}$ ⁽³⁾
Ac	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Th	$7 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-7}$
Pa	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
U	$3 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-4}$ ⁽⁴⁾
Np	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Pu	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-8}$
Am	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Cm	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$

⁽¹⁾ Tabelliert sind die Werte der Nagra. Abweichende Einschätzungen der HSK: siehe weitere Fussnoten.

⁽²⁾ Die HSK verwendet $1 \cdot 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$.

⁽³⁾ Die HSK verwendet $5 \cdot 10^{-8} \text{ mol dm}^{-3}$.

⁽⁴⁾ Die HSK verwendet $2 \cdot 10^{-2} \text{ mol dm}^{-3}$.

Für Strontium wählte die Nagra die Konzentration von $2 \cdot 10^{-5} \text{ mol dm}^{-3}$ im Bentonitwasser als Referenzwert für die maximale Löslichkeit, weil die Sr-Konzentration im Bentonit über Ionenaustauschgleichgewichte gepuffert ist. Die HSK anerkennt, dass die Pufferkapazität des Bentonits gross ist und über lange Zeit die Konzentration von Sr im Nahfeld bestimmen wird. Im Grenzbereich zwischen Abfallmatrix und Bentonit ist jedoch eine Konzentrationserhöhung bis zum Sättigungsgleichgewicht von Coelestin (SrSO_4) denkbar, wodurch die Sr-Konzentration bis auf $1 \cdot 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$ ansteigen kann. Diesen Wert, der von der Nagra als oberer Grenzwert verwendet wird, zieht die HSK als Referenzwert vor und verwendet ihn auch für oxidierende Bedingungen.

Zirkonium zeigt eine starke Tendenz zur Bildung von Karbonatkomplexen, für deren Stabilitätskonstanten jedoch bis heute nur Schätzwerte vorhanden sind. Die maximale Löslichkeit von ZrO_2 ist deshalb stark vom $p(\text{CO}_2)$ -Wert abhängig. Die Nagra verwendete für den Tetrakarbonatkomplex von Zr(IV) einen Schätzwert aus der Literatur und erhielt damit für den $p(\text{CO}_2)$ -Bereich des Nahfeldwassers eine maximale Zr-Löslichkeit, die zwischen $2 \cdot 10^{-11}$ und $2 \cdot 10^{-9} \text{ mol dm}^{-3}$ liegt. Sie verwendete den oberen Grenzwert von $2 \cdot 10^{-9} \text{ mol dm}^{-3}$ auch als Referenzwert. Die HSK erachtet den Referenzwert als akzeptabel, setzt aber den oberen Grenzwert wegen der nur schätzungsweise bekannten Stabilität des Tetrakarbonatkomplexes von Zr(IV) um eine Grössenordnung höher auf $2 \cdot 10^{-8} \text{ mol dm}^{-3}$.

Zinn liegt nach gegenwärtigen Kenntnissen in der vierwertigen Oxidationsstufe vor, über die nur spärliche Gleichgewichtsdaten vorhanden sind. Die Hydrolyse wurde über den gesamten pH-Bereich gemessen, doch ist kaum etwas über andere mögliche Komplexe bekannt. Wie andere Beispiele zeigen, können insbesondere Karbonatkomplexe einen wesentlichen Einfluss auf die maximale Löslichkeit ausüben. Der von der Nagra gewählte Referenzwert von $1 \cdot 10^{-8} \text{ mol dm}^{-3}$ entspricht dem heutigen Kenntnisstand. Für den oberen Grenzwert erscheint der HSK der Wert der Nagra von $1 \cdot 10^{-7} \text{ mol dm}^{-3}$ im Lichte des Mangels an Wissen über das Verhalten von Sn(IV) in Anwesenheit diverser Liganden jedoch zu wenig vorsichtig. Die HSK schlägt den konservativeren Wert von $1 \cdot 10^{-5} \text{ mol dm}^{-3}$ vor.

Europium ist ein vergleichsweise gut untersuchtes Lanthanid, das von der Nagra berechtigterweise als Analogon für Samarium und Holmium verwendet wurde. Die chemische Ähnlichkeit innerhalb der Lanthanidenreihe ist experimentell gut abgestützt und in der Fachwelt anerkannt. Die Berechnungen der Nagra zeigen, dass im Nahfeld Karbonat-, Sulfat- und Silikatkomplexe dominieren. Der Referenzwert von $5 \cdot 10^{-7} \text{ mol dm}^{-3}$ entspricht dem heutigen Kenntnisstand. Die HSK ist der Ansicht, dass der obere Grenzwert eine Grössenordnung über dem Referenzwert anzusetzen ist, weil die den Berechnungen zugrunde liegenden Stabilitätskonstanten zum Teil Einzelmessungen sind, die noch nicht kritisch überprüft wurden.

Für Radium beschritt die Nagra neue Wege und postulierte die Bildung von Mischphasen von BaSO_4 und RaSO_4 , woraus sie eine maximale Ra-Konzentration von $2 \cdot 10^{-11} \text{ mol dm}^{-3}$ berechnete. Würde vom traditionellen Sättigungsmodell mit RaSO_4 ausgegangen, läge die maximale Ra-Konzentration bei $5 \cdot 10^{-8} \text{ mol dm}^{-3}$. Aus zahlreichen Beispielen ist bekannt, dass in der Natur Mischphasen gebildet werden, und die HSK zweifelt nicht daran, dass solche Prozesse auch in einem Tiefenlager stattfinden können. Die zeitliche Entwicklung ist in diesem Fall jedoch von zentraler Bedeutung. Das Mischphasenmodell der Nagra setzt voraus, dass das Ra-Inventar des Abfalls im gesamten Bentonit verteilt ist, was zumindest in der Anfangsphase der Freisetzung nicht zutrifft. Für diese Phase ist die auf dem Sättigungs-

modell mit RaSO_4 beruhende höhere Löslichkeit von $5 \cdot 10^{-8} \text{ mol dm}^{-3}$ zu verwenden. Der von der Nagra vorgeschlagene, tiefere Wert wird zu einem späteren Zeitpunkt der Freisetzung realistischer sein. Mit den vorhandenen Kenntnissen ist es jedoch schwierig, diesen Zeitpunkt abzuschätzen. Deshalb verwendet die HSK vorläufig den Wert von $5 \cdot 10^{-8} \text{ mol dm}^{-3}$ als Referenzwert. Für den Fall einer Weiterführung des Projekts empfiehlt die HSK der Nagra, die Bildung von Mischphasen vertieft zu untersuchen und der Frage der Kinetik besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Für Protactinium existieren kaum thermodynamische Daten. Die maximale Pa-Löslichkeit kann daher nur grob geschätzt werden. Mit $1 \cdot 10^{-8} \text{ mol dm}^{-3}$ wählte die Nagra einen Wert, der im Bereich der maximalen Löslichkeiten der Actiniden U, Np und Pu liegt. Die unter Nahfeldbedingungen vorliegenden Oxidationsstufen dieser Actiniden scheinen jedoch nicht mit derjenigen von Pa überein zu stimmen: Pa(V), U(IV), Np(IV), Pu(III). Unterschiedliche Oxidationsstufen zeigen zum Teil drastische Differenzen im chemischen Verhalten, weshalb ein derartiger Vergleich fragwürdig ist. Neptunium liegt unter oxidierenden Bedingungen als Np(V) vor, das mit $1 \cdot 10^{-5} \text{ mol dm}^{-3}$ eine markant höhere Löslichkeit aufweist als Np(IV). Die Nagra hat diesen Wert für Pa als oberen Grenzwert und für oxidierende Bedingungen verwendet. Die HSK wählt ihn auch als Referenzwert für Pa.

Die Löslichkeitslimite der Nagra für Uran unter reduzierenden Bedingungen wurde für amorphes UO_2 berechnet. Unter oxidierenden Bedingungen findet die Nagra Compreignacit, ein U(VI)-Mineral mit der chemischen Zusammensetzung $\text{K}_2(\text{UO}_2)_6\text{O}_4(\text{OH})_6 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, als stabile Festphase mit einer Löslichkeit von $3 \cdot 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$. Das Löslichkeitsprodukt von Compreignacit wurde lediglich durch Auflösungsreaktionen gemessen, und es ist fraglich, ob sich dieses Mineral aus übersättigter Lösung bilden kann. Beim etwas besser löslichen Rutherfordin (UO_2CO_3) besteht dieser Vorbehalt kaum, weshalb seine maximale Löslichkeit von $2 \cdot 10^{-2} \text{ mol dm}^{-3}$ von der HSK bevorzugt wird.

4.5.3.8 Sorptionskoeffizienten der Radionuklide

Auf dem Ausbreitungspfad gehen die Radionuklide – wie andere Wasserinhaltsstoffe – Wechselwirkungen mit den Festkörperoberflächen ein und bleiben teilweise an diesen haften. Das Ausmass dieser Haftung wird durch Sorptionskoeffizienten (auch Verteilungskoeffizienten, K_d - oder R_d -Werte genannt) beschrieben. Diese werden wie Gleichgewichtskonstanten verwendet und quantifizieren in summarischer Weise die zwischen Radionukliden und Festkörperoberflächen auftretenden chemischen und physikalischen Wechselwirkungen.

Sorptionskoeffizienten werden bevorzugt im so genannten Batch-Verfahren gemessen. Dabei wird eine kleine Menge der Festphase solange mit einer auf die Festphase abgestimmten, das zu untersuchende Radionuklid enthaltenden Lösung kontaktiert, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Darauf wird die Verteilung der Radionuklide zwischen Lösung und Festphase gemessen. Auf diese Weise lässt sich der Einfluss wichtiger Parameter wie pH-Wert, Wasserzusammensetzung und Nuklidkonzentration systematisch untersuchen, woraus sich Rückschlüsse auf die Art der Oberflächenreaktionen gewinnen lassen. Radionuklide können einerseits an den planaren Oberflächen des Bentonits, die eine permanente negative Ladung tragen, durch Ionenaustausch sorbieren. Andererseits sind an Kanten und Ecken der Bentonitplättchen freistehende Hydroxylgruppen vorhanden, die als Säure oder Base wirken und kovalente Bindungen mit Lösungsspezies eingehen können. Dadurch entstehen Oberflächenkomplexe, deren Stabilität vom pH-Wert abhängt, und die zu einer

starken Adsorption von Radionukliden führen können. Durch die Kenntnis dieser Oberflächengleichgewichte lassen sich die Sorptionskoeffizienten wissenschaftlich erklären und modellhaft nachvollziehen. Das Heranziehen von Analogien zwischen Elementen bei Datenmangel setzt ebenfalls voraus, dass die Sorptionsmechanismen bekannt sind.

Da die Situation im Batch-Versuch nicht derjenigen im intakten geologischen Milieu entspricht, muss die Übertragbarkeit der Laboraten auf *in situ*-Bedingungen überprüft werden. Insbesondere im Porenwasser von verdichtetem Bentonit ist aufgrund der permanenten negativen Oberflächenladung ein anderer Chemismus zu erwarten als in den grossen Wasservolumina, die bei Batch-Versuchen verwendet werden. Daher wird speziell bei Bentonit darauf geachtet, dass die K_d -Werte mit den Ergebnissen aus Diffusionsmessungen in verdichtetem Bentonit vereinbar sind.

Angaben der Nagra

Der von der Nagra verwendete Sorptionsdatensatz enthält einen Referenzwert mit unterem und oberem Grenzwert für den Variationsbereich, sowie einen Wert für oxidierende Bedingungen. Die Herleitung der Daten ist in NTB 02-18 ausführlich beschrieben. Die von der Nagra verwendeten Sorptionskoeffizienten sind in Tabelle 4.5-4 aufgeführt. Bei der Datenselektion wurde den eigenen Messungen, die am PSI an MX-80 Bentonit durchgeführt wurden, höchste Priorität gegeben. Zweite Priorität hatten Literaturdaten, die an Bentonit oder Montmorillonit gemessen wurden und aus systematischen Untersuchungen stammten, also beispielsweise als Funktion des pH oder in Form von Konzentrationsreihen gemessen wurden. An dritter Stelle folgten Einzelmessungen unter ausreichend spezifizierten Bedingungen. Falls schliesslich keine brauchbaren Messungen zur Verfügung standen, wurde meist auf chemische Analogien abgestützt.

Die K_d -Werte wurden gemäss einem am PSI entwickelten Modell einer Reihe von Korrekturen unterworfen, um sie auf die chemischen Bedingungen des Bentonits abzustimmen. Zur Anwendung kamen ein Korrekturfaktor für die Mineralogie, einer für den pH-Wert und einer für die Speziation. Der Faktor für die Mineralogie basiert auf der Kationenaustauschkapazität, die als Mass für den Anteil an sorbierenden Oberflächen betrachtet wurde. Dabei verwendete die Nagra diesen Faktor auch für Elemente, die nicht durch Ionenaustausch, sondern durch Oberflächenkomplexierung sorbieren, und nahm dabei an, dass die verschiedenen Oberflächenarten in Bentoniten in ähnlichen Verhältnissen auftreten. Für den pH-Faktor wurde eine unter möglichst relevanten Bedingungen gemessene Eichkurve benötigt. Mit dem Speziationfaktor wollte die Nagra den Effekt, den gelöste Liganden auf das Sorptionsgleichgewicht haben, quantitativ berücksichtigen. Dabei wurde die Speziation der Radionuklide unter experimentellen Bedingungen mit der Speziation unter Referenzbedingungen verglichen. Die Nagra ging pragmatisch vor und nahm an, dass nur die nicht komplexierten Ionen sowie die positiven und neutralen Hydroxokomplexe sorbierten, während alle anderen Komplexe als nicht-sorbierend angesehen wurden.

Die Übertragbarkeit der K_d -Werte von Laborbedingungen auf verdichteten Bentonit wurde am PSI mit Hilfe mehrerer Referenzsysteme (NTB 02-17) überprüft. In der Studie wurden aus Diffusionsmessungen von Cs(I), Ni(II), Sm(III), Am(III), Zr(IV) und Np(V) im natürlichen Bentonit Kunigel V1 bei Trockendichten zwischen 400 und 2000 m^3kg^{-1} K_d -Werte abgeleitet. Diese wurden mit K_d -Werten aus Batch-Experimenten verglichen, die mittels der oben erwähnten Korrekturfaktoren an die chemischen Bedingungen des jeweiligen Systems ange-

passt wurden. Die Resultate zeigten eine gute Übereinstimmung zwischen den K_d -Werten aus Diffusionsmessungen und denjenigen aus Batch-Messungen.

Die Nagra liess am PSI systematische Sorptionsmessungen mit Ni(II), Se(IV), Sn(IV), I(-I), Cs(I), Eu(III) und Th(IV) auf Bentonit MX-80 in synthetischem Bentonitwasser bei pH-Werten von 7.6 bis 7.8 durchführen. Das erst zu einem späteren Zeitpunkt definierte Referenz-Bentonitwasser (Tabelle 4.5-2) hat einen pH-Wert von 7.25 und eine abweichende Zusammensetzung (NTB 02-18). Dank der zusätzlichen Messung der pH-Abhängigkeit der Sorption bei diesen Elementen war die Nagra in der Lage, die Sorptionswerte für diese pH-Differenzen zu korrigieren. Die Unterschiede in der Wasserzusammensetzung wurden mittels Spezifikationsfaktor näherungsweise eingerechnet.

Aus diesen Messungen ergaben sich zum Teil sehr hohe K_d -Werte: Für Sn(IV) resultierte $K_d = 800 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$, und für Th(IV) wurde $K_d = 60 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ gemessen, wobei die zahlreichen Messwerte nur wenig streuten.

Mehrere dieser gut abgestützten Werte verwendete die Nagra auch für andere Elemente unter der Annahme eines analogen chemischen Verhaltens: Der K_d -Wert von Th(IV) wurde auch für Tc(IV), U(IV) und Np(IV) verwendet, der K_d -Wert von Sn(IV) für Zr(IV). Abweichungen sind auf Unterschiede in der Speziation zurückzuführen. So wurde für Uran ein K_d -Wert von $40 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ gewählt, weil ein Teil des Elements in der oxidierten Form U(VI) vorliegt, der die Nagra konservativerweise keine Sorptionseigenschaften zuwies; Zirkonium liegt im Gegensatz zu Zinn grösstenteils als anionischer Hydroxokomplex vor, den die Nagra als nicht sorbierend betrachtete, weshalb trotz der Analogie zu Sn ein wesentlich tieferer K_d -Wert von $80 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ für Zr resultierte.

Der für Se(IV) gemessene K_d -Wert wurde für Po(IV) verwendet, wobei die Nagra für Selen selbst $K_d = 0$ wählte, weil es in der reduzierten Form Se(-II) vorliegt. Bei Beryllium ging die Nagra von einer Analogie mit Ni(II) aus, weil die chemischen Eigenschaften des Erdalkaliions Be(II) eher mit denjenigen der zweiwertigen Übergangsmetalle vergleichbar sind als mit denjenigen der anderen Erdalkalitionen (Ca, Sr, Ra). Der K_d -Wert von Eu(III) wurde generell für die Lanthaniden verwendet, nicht aber für die dreiwertigen Actiniden (Ac, Pu, Am, Cm). Für diese wurden Sorptionsmessungen auf Montmorillonit aus der Literatur bevorzugt. Europium selbst wurde in der Tabelle nicht aufgeführt, weil es nicht sicherheitsrelevant ist.

Die Sorption der restlichen Erdalkaliionen (Ca, Sr, Ra) wurde mit Hilfe eines Ionenaustauschmodells berechnet. Für die Sorption des in Form von Karbonat vorliegenden C_{inorg} ging die Nagra von einem Isotopenaustausch von ^{14}C mit den kohlenstoffhaltigen Festphasen aus. Eine schwierige Frage war, abzuschätzen, welcher Anteil der Karbonatphasen für einen Isotopenaustausch zur Verfügung steht. Die Nagra stützte sich dabei auf eine frühere Betrachtung in NTB 96-05, in der aufgrund von Informationen aus der Literatur angenommen wurde, dass die obersten 30 molekularen Schichten bzw. 10 nm des Kalzits für Isotopenaustausch mit Karbonat aus dem Porenwasser zur Verfügung stehen. Mit der zugänglichen spezifischen Oberfläche in intaktem Kalzit schätzte die Nagra ab, dass 0.27 % der Karbonatfestphasen für Isotopenaustausch zur Verfügung stehen, was zu einem K_d -Wert von $6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ führte.

Die Werte für Nb(V) und Pb(II) stammen von Sorptionsmessungen aus der Literatur. Im Falle von Pd und Pa war die Nagra infolge Datenmangels auf Abschätzungen angewiesen. Für H, C_{org} , Cl, Mo und Ag setzte die Nagra $K_d = 0$ ein.

Wie bei den Löslichkeitslimiten berücksichtigte die Nagra im Rahmen eines „*what if case*“ den Einfluss einer hypothetischen Redoxfront im Nahfeld und erhöhte den Eh-Wert des Bentonit-Referenzporenwassers (Tabelle 4.5-2) auf +635 mV. Für diese Bedingungen erwartet die Nagra aufgrund von Änderungen in den Oxidationsstufen für die Elemente Se, Tc, U, Np und Pu ein verändertes Sorptionsverhalten. Der K_d -Wert von Tc wurde wegen Oxidation zum mobilen Tc(VII) auf Null und die K_d -Werte von U und Np wegen der Oxidation zu U(VI) und Np(V) auf $0.01 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ herabgesetzt. Für Plutonium, das unter diesen Bedingungen als ein Gemisch von Pu(IV) und Pu(V) vorliegt, verwendete die Nagra $K_d = 10 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$, resultierend aus der Analogie mit Th(IV) und der Anwendung eines Korrekturfaktors für die Speziation. Der K_d -Wert von Selen von $0.06 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ stammt aus den eigenen Messungen mit Se(IV). Im später publizierten NTB 02-18 wurde allerdings darauf hingewiesen, dass Se gemäss Speziationsrechnungen (NTB 02-10) bei +635 mV in der Oxidationsstufe +VI vorliegen würde, weshalb mit einer äusserst geringen Sorption gerechnet werden muss und $K_d = 0$ eine realistischere Annahme ist.

Beurteilung der HSK

Die HSK hat für jedes Element den Referenzwert, den unteren Grenzwert und den Wert für oxidierende Bedingungen überprüft (HSK 35/82). Die oberen Grenzwerte wurden von der Nagra für die probabilistischen Analysen benötigt und sind von der HSK nicht überprüft worden, da sie weniger sicherheitsrelevant sind. In Tabelle 4.5-4 sind die von der HSK verwendeten K_d -Werte aufgelistet und den Werten der Nagra gegenübergestellt.

Die Herleitung und Selektion der Sorptionskoeffizienten ist in allen Fällen nachvollziehbar und in den meisten Fällen plausibel. Die Verwendung von Korrekturfaktoren für die Mineralogie, den pH-Wert und die Speziation erlaubt eine quantitative Berücksichtigung von Änderungen in den chemischen Einflussgrössen. Voraussetzung für die Verwendung solcher Korrekturfaktoren ist die Kenntnis der Sorptionsmechanismen. Der Korrekturfaktor für die Speziation ist noch unbefriedigend, weil er von allzu pauschalen Voraussetzungen ausgeht und die potentielle Sorption mehrerer Lösungsspezies unberücksichtigt lässt. Je besser das Verständnis der Sorptionsmechanismen ist, desto realistischer kann dieser Korrekturfaktor bestimmt werden.

Aus der guten Übereinstimmung zwischen den K_d -Werten aus Diffusionsmessungen und denjenigen aus Batch-Messungen (NTB 02-17) lässt sich schliessen, dass das Modell für die Wasserzusammensetzung im verdichteten Bentonit die Realität richtig wiedergibt. Zu vielen von der Nagra verwendeten Sorptionskoeffizienten hat die HSK keine Einwände anzubringen, mit den nachfolgend erwähnten Ausnahmen.

Bei den Elementen Sn, I, Po, Th, Pa, U und Np akzeptiert die HSK den Referenzwert, zieht aber wegen vorhandener Ungewissheiten eine tiefere untere Limite und damit eine grosszügigere Sicherheitsmarge vor.

Tabelle 4.5-4: Sorptionskoeffizienten [m^3kg^{-1}] im Bentonit (Nahfeld BE/HAA). Die chemische Zusammensetzung des Porenwassers ist in Tabelle 4.5-2 aufgeführt. Als *Lower Limit* wird der pessimistische untere Grenzwert des Sorptionskoeffizienten bezeichnet. HSK-Werte, die von den Nagra-Werten abweichen, sind **fett gedruckt**.

Element	Referenzwert Nagra	Referenzwert HSK	<i>Lower Limit</i> Nagra	<i>Lower Limit</i> HSK	Oxidierende Bedingungen ⁽¹⁾
H	0	0	0	0	
Be	0.2	0.2	0.009	0.009	
C _{inorg}	$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	
C _{org}	0	0	0	0	
Cl	0	0	0	0	
Ca	0.003	0.003	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	
Ni	0.2	0.2	0.009	0.009	
Se	0	0	0	0	0.06 ⁽²⁾
Sr	0.003	0.003	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	
Zr	80	10	1	1	
Nb	30	1	1	0.1	
Mo	0	0	0	0	
Tc	60	0.2	0.5	0.02	0
Pd	5	5	0.2	0.2	
Ag	0	0	0	0	
Sn	800	800	1	0.1	
I	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	0	
Cs	0.1	0.03	0.03	0.005	
Sm	4	4	0.1	0.1	
Ho	4	4	0.1	0.1	
Pb	7	7	0.5	0.5	
Po	0.06	0.06	0.008	0	
Ra	0.002	0.002	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	
Ac	20	4	1	0.1	
Th	60	60	10	5	
Pa	5	5	0.2	0.05	
U	40	40	2	0.2	0.01
Np	60	60	6	0.5	0.01
Pu	20	4	1	0.1	10
Am	20	4	1	0.1	
Cm	20	4	1	0.1	

⁽¹⁾ Tabelliert sind die Werte der Nagra, falls sie sich vom Referenzwert unterscheiden. Die Werte beziehen sich auf einen Nahfeld-Eh von +635 mV (*what if case*).

⁽²⁾ Die Nagra verwendete diesen Wert in ihren Rechnungen zum *what if case*. Die HSK verwendet $K_d = 0$.

Bei Zr(IV) und Tc(IV) erachtet die HSK die experimentelle Basis und den aktuellen Kenntnisstand als ungenügend, um auf eine Analogie mit Sn(IV) resp. Th(IV) zu schliessen und deren K_d -Werte zu verwenden (im Fall von Zr mit einer Korrektur für die Speziation). Die HSK zieht es vor, bei Zr auf Diffusionsexperimente im Bentonit Kunigel V1 abzustützen, woraus sich $K_d = 10 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ ableiten lässt. Auch bei Tc sind Diffusionsexperimente in verschiedenen Bentoniten vorhanden, in denen durch Zusatz von elementarem Eisen versucht wurde, reduzierende Bedingungen zu erzeugen, so dass Tc in der Oxidationsstufe +IV vorlag und nicht in Form des sehr mobilen Pertechnetats TcO_4^- . Es ist möglich, dass dies nur teilweise gelungen ist und die daraus resultierenden K_d -Werte (0.2 bis $1 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$) daher unterschätzt sind. Dennoch erachtet es die HSK als nicht vertretbar, mit dem heutigen Wissensstand für Tc einen höheren K_d -Wert als $0.2 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ zu verwenden. Die HSK setzt den unteren Grenzwert bei Zr und Tc um den Faktor 10 tiefer als den Referenzwert.

Im Falle von Niob verwendete die Nagra K_d -Werte an Sedimenten und korrigierte sie auf den generell wesentlich stärker sorbierenden Bentonit. Gegen eine solche Korrektur ist grundsätzlich nichts einzuwenden. Der Sorptionsmechanismus von Niob ist jedoch unbekannt, das Hydrolyseverhalten von Nb(V) scheint komplex zu sein (Lothenbach et al. 1999), und die bisher nicht untersuchte Wechselwirkung von Nb(V) mit Karbonat könnte die Sorption beeinträchtigen. Diffusionsmessungen, die einen Hinweis auf die Rückhaltung im intakten Bentonit geben könnten, sind keine vorhanden. Die HSK erachtet es unter diesen Umständen als notwendig, einen grosszügigen Sicherheitsfaktor einzubauen. Ein K_d -Wert in der Grössenordnung des auf den Sedimenten gemessenen Werts (ca. $1 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$) ist konservativ und trägt den Ungewissheiten gebührend Rechnung. Den unteren Grenzwert setzt die HSK um den Faktor 10 tiefer.

Für Cäsium besteht eine gute experimentelle Grundlage, auch was Diffusionsmessungen anbelangt. Die Nagra stützte bei der Wahl des K_d -Wertes von Cs auf die eigenen Batch-Messungen ab. Die Vergleiche von K_d -Werten aus Batch-Versuchen mit solchen aus Diffusionsexperimenten in NTB 02-17 zeigten jedoch eine Abnahme des K_d -Werts von Cs auf dem Bentonit Kunigel V1 mit zunehmender Trockendichte des Bentonits. Aufgrund der vorhandenen Daten scheint der HSK ein tieferer K_d -Wert von $0.03 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ und ein unterer Grenzwert von $0.005 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ eher gerechtfertigt.

Im Falle von Americium wählte die Nagra als Datengrundlage systematische Messungen an einem konditionierten Na-Montmorillonit, bei denen allerdings eine reine Perchlorat-Lösung als Elektrolyt verwendet wurde. Dies hatte zur Folge, dass sich keine Karbonat- und Sulfatkomplexe bildeten. Diese machen jedoch gemäss den Berechnungen am PSI im Bentonit-Porenwasser mehr als 50 % der Am(III)-Komplexe aus (NTB 02-10). Die Anwesenheit solcher Komplexe hat auch Auswirkungen auf die pH-Abhängigkeit der Sorption, wie die systematischen Daten über die Sorption von Eu(III) auf Bentonit MX-80 und Na-Montmorillonit deutlich zeigen (NTB 02-18). Die HSK ist der Ansicht, dass der von der Nagra verwendete K_d -Wert von $20 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ für Am mit einigen Ungewissheiten behaftet ist und erachtet es als vorsichtiger, den K_d -Wert von $4 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ des unter Nahfeld-Bedingungen ausführlich untersuchten Eu(III) zu übernehmen. Dieser Wert wird auch für Ac(III) und Cm(III) verwendet, ebenso wie für Plutonium, das praktisch vollständig als Pu(III) vorliegt. Den unteren Grenzwert von $0.1 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ übernimmt die HSK ebenfalls von den Lanthaniden.

Gegen die von der Nagra für oxidierende Bedingungen gewählten K_d -Werte von Tc, U, Np und Pu hat die HSK nichts einzuwenden. Für Se zieht die Nagra heute $K_d = 0$ (NTB 02-18) statt $0.06 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ vor, was in Tabelle 4.5-4 entsprechend vermerkt ist.

4.5.3.9 Diffusionskoeffizienten

Der Transport gelöster Stoffe im Bentonit erfolgt durch Diffusion, für deren Modellierung Diffusionskoeffizienten (auch Diffusivitäten genannt) benötigt werden. Der Zusammenhang zwischen den massgeblichen Koeffizienten und dem K_d -Wert wird aus der folgenden Gleichung ersichtlich:

$$D_a = \frac{D_e}{\varepsilon + \rho_d K_d}$$

D_a ist der scheinbare, D_e der effektive Diffusionskoeffizient, ε die Porosität und ρ_d die Trockendichte des Bentonits. D_e lässt sich im Diffusionsexperiment direkt bestimmen; der dafür notwendige stationäre Zustand ist in Laborexperimenten bisher nur bei schwach sorbierenden Tracern erreicht worden. D_a -Werte lassen sich aus Diffusionsprofilen ableiten. Bei sehr stark sorbierenden Tracern ist es schwierig, zuverlässige D_a -Werte zu bestimmen, weil diese auch bei sehr langer Versuchsdauer kaum in den Bentonit eindringen. Die K_d -Werte werden vorwiegend im Batch-Verfahren bestimmt (Abschnitt 4.5.3.8). Ihre Anwendung auf *in situ*-Bedingungen bedarf oft einer Anpassung der Werte, um Unterschiede in den Wasserzusammensetzungen zu berücksichtigen.

Angaben der Nagra

Für die Modellierung der Diffusion betrachtete die Nagra den Bentonit als homogen poröses Medium und wählte bei der Festlegung der Diffusionskoeffizienten einen pragmatischen Lösungsweg. Die Nagra verwendete für die meisten Radionuklide $D_e = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ und eine Bentonit-Porosität von 0.36 (Trockendichte 1750 kg m^{-3}). Eine Ausnahme bilden jene Radionuklide, die im Tiefenlager als stabile Anionen vorliegen, für die $D_e = 3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ und eine Porosität von 0.05 verwendet wurde. Es handelt sich dabei um C_{inorg} , Cl, Se, Mo, I und Po. Bei der tieferen Porosität für Anionen handelt es sich um eine „Diffusionsporosität“ in der Annahme, dass der in verdichteten Bentonit bedeutende Porenraum der Zwischenschichten wegen der permanenten negativen Ladung für Anionen nicht zugänglich ist.

Die Nagra stützte sich bei der Festlegung dieser Werte auf eine Studie von Yu und Neretnieks (1997) und begründete die Wahl damit, dass sie eine einheitliche Behandlung der Diffusionsparameter anstrebte. Sie erkannte, dass die Verwendung von K_d -Werten aus Batch-Versuchen die Kenntnis der Porenwasserzusammensetzung in verdichtetem Bentonit voraussetzt und unternahm eine Studie, um die verwendeten Modelle zu überprüfen (NTB 02-17). Dabei wurden experimentelle D_a -Werte von Cs(I), Ni(II), Sm(III), Am(III), Zr(IV) und Np(V) bei verschiedenen Bentonit-Dichten mit solchen verglichen, die von K_d -Werten aus Batch-Versuchen hergeleitet und mittels Korrekturfaktoren auf den modellierten Wasserchemismus im verdichteten Bentonit abgestimmt wurden. Die benötigten D_e -Werte wurden den D_e -Werten von tritiiertem Wasser gleichgesetzt. Die Resultate zeigen eine gute Übereinstimmung der Werte, woraus die Nagra schloss, dass sie die aus Batch-Versuchen stammenden K_d -Werte korrekt auf *in situ*-Bedingungen abgestimmt hatte.

Beurteilung der HSK

Das Vorgehen der Nagra bei der Festlegung der Diffusionskoeffizienten ist nachvollziehbar und plausibel. Die in NTB 02-09 dargestellten Modellbetrachtungen über die Porenstruktur im stark verdichteten Bentonit lassen zwar komplexere Diffusionsmechanismen vermuten, doch die verfügbaren Daten lassen keine Verfeinerung der Modelle zu.

Ob die Realität mit der Verwendung eines einheitlichen Wertepaares von D_e und ε für die stabilen Anionen und eines weiteren einheitlichen Wertepaares für alle anderen Radionuklide korrekt wiedergegeben werden kann, ist fraglich. Die vorhandenen Diffusionsmessungen deuten jedoch darauf hin, dass das Modell der Nagra zweckmässig ist und korrekte Voraussagen machen kann (NTB 02-17). Bei redox-sensitiven Radionukliden wie Tc ist die Übereinstimmung allerdings schlechter. In solchen Fällen müssen die K_d -Werte so angepasst werden, dass das modellierte Diffusionsverhalten den Beobachtungen entspricht und auf der sicheren Seite liegt.

Es bleibt anzumerken, dass sich die von der Nagra verwendeten Diffusionsdaten auf Messungen bei Raumtemperatur stützen. Diffusionsmessungen bei erhöhter Temperatur sind in der Literatur selten. Im Bentonit herrscht jedoch nach 10'000 Jahren noch eine Temperatur von 50°C vor, und im Zeitpunkt der minimalen Auslegungslbensdauer der Behälter (1'000 Jahre) beträgt die Temperatur im Nahfeld noch ca. 90°C. Die experimentelle Untersuchung von Martín *et al.* (2000) bei Temperaturen bis 100°C legt nahe, dass die Temperaturabhängigkeit der Diffusion im Bentonit je nach Radionuklid sehr unterschiedlich sein kann.

Für den Fall einer Weiterführung des Projekts empfiehlt die HSK der Nagra, das Diffusionsverhalten sorbierender Radionuklide im Bentonit eingehender zu untersuchen. Dadurch könnten realistischere Voraussagen über D_e gemacht und Unsicherheiten abgebaut werden. Im Weiteren empfiehlt die HSK, den Einfluss der Temperatur auf das Diffusionsverhalten der Radionuklide im Bentonit abzuklären.

4.5.3.10 Beitrag der Bentonitverfüllung zur Sicherheit

Die Bentonitverfüllung hat im Tiefenlagerkonzept mehrere unterschiedliche Aufgaben zu erfüllen. Sie muss den Behälter tragen, damit er ungefähr in der Tunnelachse verbleibt. Als plastisches Material schützt sie ihn auch vor ungleichmässiger mechanischer Beanspruchung im Fall, dass eine tektonische Störzone den Lagerbereich treffen sollte. Die Bentonitverfüllung schützt den Behälter auch auf eine andere Weise, indem sie als Migrationsbarriere die Ablaufrate solcher Korrosionsprozesse beschränkt, die von der Migration korrosiver Stoffe zum Behälter abhängen. Dadurch sorgt sie für eine längere Lebensdauer des Behälters, d.h. eine längere Zeit des absoluten Einschlusses der Radionuklide. Die Bentonitverfüllung verzögert durch ihre geringe Wärmeleitfähigkeit die Aufwärmung des angrenzenden Wirtgesteins. Da die Wärmeleistung des Behälters mit der Zeit abnimmt, werden dank der Verzögerung weniger hohe Temperaturen im Wirtgestein erzeugt. Die bisher genannten Aufgaben hat die Bentonitverfüllung von Anfang an zu erfüllen. Nach Versagen des Behälters kommt eine weitere Aufgabe hinzu: die Wirkung als Migrationsbarriere für die Radionuklide, die aus dem Behälter freigesetzt werden. Hier kommen neben der geringen Durchlässigkeit auch die günstigen Sorptionseigenschaften der Tonpartikel zum Zuge.

Bentonit ist in vieler Hinsicht ein besonderes Material. Bei der Dichte, die er im Tiefenlager hat, ist die Porengrösse überwiegend sehr klein, was zu geringer Durchlässigkeit führt. Die Nuklidmigration findet überwiegend durch Diffusion statt. Die kleine Porengrösse hat eine weitere Folge: Ein wesentlicher Teil des Porenraums wird durch die elektrische Ladungsverteilung in den Tonpartikeln beeinflusst. Dadurch wird das Migrationsverhalten der (elektrisch geladenen) gelösten radioaktiven Stoffe beeinflusst. Das äussert sich beispielsweise darin, dass Anionen und Kationen unterschiedliches Diffusionsverhalten im Bentonit aufweisen. Die Bentonitverfüllung hat unterschiedlich starke Barrierenwirkung für Anionen und Kationen. Eine weitere Besonderheit ist die Quelfähigkeit des Bentonits, die im Zusammenhang mit der räumlichen und elektrischen Struktur der Tonpartikel steht. Im beschränkten Volumen des Stollens entsteht durch das Quellen ein erhöhter Druck, der zwei erwünschte Folgen hat: Die plastische Konvergenz der Stollenwände wird durch einen Gegendruck aufgehalten, und die mechanische Auflockerungszone des Wirtgesteins im Bereich der Stollenwände wird zusammengepresst. Die erhöhte Durchlässigkeit der Auflockerungszone wird durch das Zusammenpressen wieder reduziert. Der Bentonit ist plastisch, bei erhöhter Dichte (erhöhtem Druck) nimmt die Plastizität ab. Die Dichte der Bentonitverfüllung muss hoch genug gewählt werden, damit der Behälter langfristig in der Stollenachse gehalten wird.

Damit die Bentonitverfüllung ihre Aufgaben erfüllen kann, muss sie selber langfristig stabil sein. Die Porenwasserchemie von Bentonit und Opalinuston ist ähnlich genug, dass nicht mit chemischer Instabilität gerechnet werden muss. Der Bentonit kann aber bei hohen Temperaturen und in hohen Temperaturgradienten chemische und physikalische Veränderungen erleiden, insbesondere wenn er nur teilweise mit Wasser gesättigt ist. Eine weitere ungünstige Beeinflussung der Bentonitbarriere entsteht dadurch, dass Wasserstoffgas, das bei der Korrosion der Behälter entsteht, durch die Verfüllung entweichen muss. Die geringe Durchlässigkeit, die sonst sehr erwünscht ist, erweist sich hier als nachteilig. Der Gasdruck steigt so hoch an, dass eine mechanische Beeinflussung des Bentonits mit dem Gasentweichen verbunden ist. Dank der Plastizität des Bentonits verschliessen sich aber die entstehenden Gaskanäle wieder.

Der Bentonit wird in der Form eines Granulats in den Stollen eingebracht. Er enthält dann noch einen gewissen Anteil grösserer, verbundener Poren. Erst infolge der Aufsättigung mit Wasser wird die Verfüllung homogen und die vorher genannten Eigenschaften gelten uneingeschränkt.

Aus dem bisher gesagten wird klar, dass quantitative Aussagen über die Eigenschaften und die Entwicklung des Bentonits eine umfassende Modellierung von gekoppelten Prozessen erfordern, bei der die zeitliche Entwicklung der thermischen, mechanischen, hydraulischen und chemischen Verhältnisse in ihren wechselseitigen Abhängigkeiten berücksichtigt wird. In einigen Aspekten besteht heute noch Bedarf für weitere Untersuchungen. So muss das Verhalten des Bentonits bei hohen Temperaturen und Temperaturgradienten weiter untersucht werden, um mögliche bleibende Beeinträchtigungen seiner guten Eigenschaften besser eingrenzen zu können. Ebenfalls müssen die beim Gasdurchbruch auftretenden Phänomene eingehender abgeklärt werden. Die Materialeigenschaften des Bentonitgranulats bedürfen einer breiteren experimentellen Abstützung.

4.6 Technische Barrieren im LMA- Lager

Technische Barrieren, welche die Freisetzung der Radionuklide aus den LMA-Lagertunneln verzögern oder verhindern, sind:

- Das eigentliche Abfallmaterial, sowie die Matrix, in der der Abfall verfestigt ist.
- Die Verpackung (beispielsweise ein Stahlfass).
- Ein Lagercontainer oder ein Einlagerungselement aus Beton.
- Die poröse Zementverfüllung der Lagercontainer und der Lagertunnel.
- Die Auskleidung der Lagertunnel aus Beton.

In der Sicherheitsanalyse werden von den oben erwähnten technischen Barrieren nur die Zementverfüllungen betrachtet. Deren Barrierenfunktion basiert auf Rückhalteeigenschaften wie Sorption und Löslichkeitslimiten, die die Freisetzung von Radionukliden aus dem LMA-Nahfeld ins Wirtgestein verzögern.

In den folgenden Abschnitten werden die Eigenschaften der Abfälle und der Zementverfüllung, die Auswirkungen organischer Stoffe und der Gasproduktion, die chemischen Bedingungen sowie die sich daraus ergebenden Löslichkeitslimiten und Sorptionskoeffizienten diskutiert.

4.6.1 Abfallmatrizen, Abfallbehälter und Lagercontainer

Angaben der Nagra

Bei der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen entsteht eine Vielzahl von α -Emitter enthaltenden, langlebigen mittelaktiven Abfällen (LMA), die unterschiedliche Zusammensetzungen aufweisen. Als Matrixmaterial wird meist Zement verwendet, in geringerem Masse auch Bitumen. In ihrer Gesamtheit bestehen die LMA zu ca. 69 % aus zementartigen Materialien, zu 29 % aus metallischen Stoffen wie Stahl und Zircaloy und zu rund 2 % aus organischen Stoffen wie Bitumen, Kunststoffen oder Zellulose (NTB 02-05, Tab. 4.5-3). Diese Werte beziehen sich auf die jeweiligen Massenanteile der verfestigten Abfälle, einschliesslich der Zement- oder Bitumenverfestigungsmatrizen, aber ohne die für die Einlagerung benötigten Endlagercontainer.

Die Abfallsorte WA-COG-2 enthält relativ grosse Mengen Nitrat, das zu oxidierenden Bedingungen im Nahfeld führen könnte. Um sicherzustellen, dass diese Abfälle keinen schädlichen Einfluss auf die anderen eingelagerten Abfälle haben (beispielsweise durch Erhöhung der Löslichkeitslimiten oder Verminderung der Sorption der Nuklide im Nahfeld), werden sie in einem speziellen Lagertunnel (LMA-2) in sicherem Abstand von den Lagertunneln (LMA-1) der restlichen LMA untergebracht.

Da die metallischen Abfälle meist in einer Zementmatrix eingebunden sind, können korrosive Freisetzungsprozesse unter den Bedingungen im Tiefenlager nur verzögert ablaufen. Die Nuklidfreisetzungsraten aus den Abfallkomponenten sind dabei nicht einheitlich: Für Brennstoffhüllrohre und Brennelement-Strukturmaterialien kann beispielsweise das ^{14}C aus äusseren Oxidfilmen relativ schnell gelöst werden, aber die extrem niedrige Korrosionsrate der eingelagerten Legierungen ($< 10 \text{ nm/a}$) führt zu einer nur langsamen Freisetzung der anderen Radionuklide (NTB 02-05, S. 154).

Es wird erwartet, dass der Einfluss der Radiolyse von Wasser auf Redoxprozesse und H_2 -Produktion vernachlässigbar sein wird. Eine mögliche Ausnahme betrifft die Abfälle, die kompaktierte Brennelement-Hüllrohre und -Endstücke enthalten (WA-COG-4A, siehe NTB 01-01, S. 6). Diese Abfälle weisen eine genügend grosse α -Aktivität auf, um kurzfristig durch α -Radiolyse lokal oxidierende Bedingungen zu verursachen. Die chemischen Produkte der einsetzenden Stahlkorrosion werden aber längerfristig zu reduzierenden Bedingungen führen (NTB 02-05, S. 154).

Zur Verpackung der LMA werden Stahl- oder Fiberezementbehälter (die Nagra bezeichnet in NTB 02-05 sechs verschiedene Typen von LMA-Behältern) verwendet. Die LMA-Gebinde werden für die Tiefenlagerung in zwei Typen von Lagercontainern platziert. Die Wandstärken dieser Container aus Beton betragen mindestens 200 respektive 250 mm. Die Leerräume innerhalb des Lagercontainers werden nach der Beladung mit Verfüllzement mit einer mittleren Porosität von 0.3 aufgefüllt.

Wegen des in der Zementverfüllung enthaltenen Wassers setzt die Korrosion der Gebindeoberflächen unmittelbar nach der Einlagerung ein. Nach Verbrauch des anfänglich im Lager vorhandenen Sauerstoffs, führt die Korrosion der metallischen Bestandteile der Abfälle zur Gasbildung (H_2). Sie wird für reduzierende Bedingungen sorgen, da die Menge des verfügbaren Eisens bei weitem genügt, um die durch Radiolyse erzeugten oxidierenden Stoffe zu neutralisieren.

Beurteilung der HSK

Die Eigenschaften und Bestandteile der voraussichtlich anfallenden LMA sind in NTB 01-01 ausführlich dokumentiert. Die HSK begrüsst das Prinzip der getrennten Lagerung der LMA, um die möglichen Wechselwirkungen (Einfluss auf die Rückhaltungswirkung der technischen Barrieren anderer eingelagerter Abfälle) zwischen den verschiedenen Abfallsorten zu reduzieren. Die Auswirkungen der eingelagerten Nitrate werden in Abschnitt 4.6.4 behandelt.

Die HSK erachtet es als richtig, dass die Lagercontainer nicht aus Metall gefertigt sind und so kein zusätzliches Gas durch Korrosion in den LMA-Lagertunneln erzeugt wird.

4.6.2 Zementverfüllung der LMA-Lagertunnel

Angaben der Nagra

Die poröse Zementverfüllung der Lagercontainer und der Lagertunnel stellt in der Sicherheitsanalyse der Nagra die zentrale Barriere des LMA-Nahfeldes dar. Die Eignung dieser Barriere ist durch ihren porösen Aufbau und ihre retardierenden Eigenschaften gegeben.

Nach Einbringen der Lagercontainer mit den LMA in die Lagertunnel werden die Leerräume zwischen den Lagercontainern mit Mörtel verfüllt. Im vorgelegten Projekt sind Lagertunnel für LMA mit einer Gesamtlänge von 240 Metern — je 90 m für die beiden LMA-1 Lagertunnel und 60 m für den LMA-2 Lagertunnel — vorgesehen. Weil mit dem Verfüllmörtel komplizierte Hohlraumformen gefüllt werden müssen, wird der Mörtel flüssig und leicht pumpbar hergestellt. Wegen der beim Verfüllen der Lagertunnel entstehenden Hydratationswärme erwägt die Nagra, die Verfüllung in mehreren Stufen auszuführen.

Die Wiederaufsättigung der Auflockerungszone um die LMA-Lagertunnel führt zu einer Konvergenz der LMA-Lagertunnel und so zu einer Kompression der Verfüllung. Die Verfüllmaterialien sind in der Lage, die durch die Tunnelkonvergenz auftretenden Kräfte aufzunehmen und verhindern so ein Auspressen des Zementporenwassers.

Die Zementverfüllung der LMA-Lagertunnel dient auch als Speichervolumen für die durch die anaerobe Korrosion von Metallen und dem Abbau organischer Materialien entstehenden Gase (NTB 02-05, S. 157). Das Gas wird über einen Zeitraum von rund 100'000 Jahren im Abfall erzeugt und die freigesetzte Menge übersteigt das Speichervermögen des Zementporenraums um etwa einen Faktor 2. In der Sicherheitsanalyse der Nagra wird die Porosität der Zementverfüllung mit 30 % angegeben.

Obwohl der Verfüllzement porös und durchlässig ist, wird der Nuklidtransport im Nahfeld aufgrund der geringen Wasserdurchlässigkeit des umgebenden Opalinustons nicht durch Advektion, sondern durch Diffusion bestimmt sein. Die kleinen Transportraten der Radionuklide werden durch die grosse Rückhaltefähigkeit des Zements zusätzlich verringert.

In der Sicherheitsanalyse der Nagra werden die Beiträge der einzelnen technischen Barrieren im LMA-Nahfeld nicht einzeln in Betracht gezogen, sondern vereinfacht durch die retardierenden Eigenschaften (wie Löslichkeiten im Porenwasser und Sorption auf den Porenwänden) der Zementverfüllung bestimmt.

Die Wirkungsweise der technischen Barriere Zementverfüllung im LMA-Nahfeld wird von der Nagra anhand eines Modells beschrieben, in dem die Nuklide nach der Aufsättigungszeit der Tunnelverfüllung von 100 Jahren entweder im Zementporenwasser gelöst (maximal bis zur Löslichkeitsgrenze), ausgefällt oder an den Porenwänden adsorbiert sind. Wegen der Nuklid-sorption in der Zementverfüllung wird anfänglich nur ein Bruchteil des Nuklidinventars im Porenwasser freigesetzt. Nach Einsetzen der Nukliddiffusion ins Wirtgestein werden ehemals sorbierte oder aus den Actiniden-Zerfallsketten erzeugte Nuklide verzögert und über einen langen Zeitraum ins Zementporenwasser und durch Diffusion ins Wirtgestein abgegeben.

Beurteilung der HSK

Nach Ansicht der HSK ist die Verwendung von hochporösem Mörtel für die Verfüllung der LMA-Lagertunnel geeignet. Dies nicht nur wegen den mechanischen, sondern auch wegen den die Nuklidfreisetzung begrenzenden Eigenschaften. Die hohe Porosität der Zementverfüllung erlaubt es zudem, die durch Korrosion entstehenden Gase bis zu einem gewissen Masse im Porenvolumen zu speichern.

Die Zementverfüllung der LMA-Lagertunnel wirkt aufgrund ihrer Eigenschaften als eine chemische, nicht aber als hydraulische Barriere, dies im Unterschied zur Bentonitverfüllung der Lagerstollen im BE/HAA-Lager. Aufgrund der sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeit des die Zementverfüllung umgebenden Wirtgesteins ist der Nuklidtransport im Zement nicht durch Advektion, sondern durch Diffusion bestimmt. Die Modellierung der Nagra der Wirkungsweise der technischen Barriere Zementverfüllung ist nach Ansicht der HSK zweckmässig.

4.6.3 Auswirkungen organischer Stoffe

LMA enthalten verschiedene organische Stoffe wie Zellulose, Bitumen, Polymere, oder Betonzusatzmittel. Diese Stoffe können als Komplexbildner wirken und die Mobilität der

Radionuklide beeinflussen. Dazu müssen sie aber im Porenwasser in löslicher Form vorliegen. Deshalb sind nicht die im Abfall vorhandenen hochmolekularen Organika wie Zellulose oder andere Polymere, sondern ihre löslichen Abbauprodukte für die Mobilität der Radionuklide von Bedeutung. Eine wichtige Frage ist, wie schnell sich Organika im chemischen Milieu des Zement-Nahfeldes abbauen können und welches die Abbauprodukte und ihre chemischen Eigenschaften sind.

Viele Radionuklide liegen in Form von Metallionen vor, die mit anorganischen und organischen Liganden Komplexe bilden können. Komplexbildung mit Metallionen hat im Allgemeinen eine Erhöhung der Löslichkeit der Radionuklide zur Folge. Auch die Sorption kann durch Komplexbildung beeinträchtigt werden; allerdings haben insbesondere grössere organische Moleküle die Tendenz, selber zu sorbieren, was ihre Verfügbarkeit als Komplexbildner reduziert und den Effekt der Sorptionsreduktion wenigstens teilweise rückgängig macht. Organische Moleküle sind dann besonders effektive Komplexbildner, wenn sie mehrere Ligandatome enthalten, die gleichzeitig Bindungen zum Metallion eingehen können (Chelatliganden). Einer der bekanntesten Vertreter solcher Chelatliganden ist EDTA, dessen Metallkomplexe sich durch grosse Stabilität auszeichnen. Zellulose zerfällt in alkalischem Milieu zu Isosaccharinsäure (ISA), einer Polyhydroxysäure, die bei hohen pH-Werten sehr stabile Chelatkomplexe bilden kann. Auch Betonzusatzmittel und die Abbauprodukte von Bitumen und Kunststoffen können Komplexe mit Metallionen bilden und so die maximale Löslichkeit und die Sorption von Radionukliden beeinträchtigen.

Angaben der Nagra

Die Nagra hat die Frage der Komplexierung von Metallionen mit organischen Abbauprodukten am PSI ausführlich untersuchen lassen. Der Abbau von Zellulose unter alkalischen Bedingungen und der Einfluss der Abbauprodukte auf die Sorption der Modell-Metallionen Ni(II), Eu(III) und Th(IV) sind in NTB 97-04 beschrieben. Es ist bekannt, dass der alkalische Abbau von Zellulose durch verschiedene Mechanismen mit unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten erfolgt. Die Komplexbildung zwischen dem Abbauprodukt ISA und den Metallionen hat schon bei geringen ISA-Konzentrationen einen grossen Einfluss auf die maximalen Löslichkeiten und die Sorption. Unter Nahfeldbedingungen ist die Auswirkung auf die Sorption allerdings deutlich geringer, weil ISA stark auf Zement sorbiert. Neue Untersuchungen des Zelluloseabbaus bei 60°C und 90°C (NTB 03-08) über ein bis zwei Jahre zeigten kaum Unterschiede zwischen den beiden Temperaturen, wiesen aber auf einen komplexeren Verlauf der Zelluloseabbaus hin als bisher angenommen. Insbesondere setzte sich der Abbau nach etwa 100 Tagen nicht mehr weiter fort, obwohl erst etwa 60 % der Zellulose abgebaut war. Damit wurde eine Studie von Pavasars (1999) in Frage gestellt, die aufgrund einer Extrapolation einen raschen und vollständigen Abbau der Zellulose voraussagte. Nach Einschätzung des PSI und der Nagra ist die maximal zu erwartende Konzentration von gelöstem ISA zu gering, um einen nachteiligen Einfluss auf die Löslichkeit und die Sorption der Radionuklide im Zementnahfeld auszuüben.

Weitere im Nahfeld vorhandene Organika sind Betonzusatzmittel wie Glukonat, Naphthalinsulfonat, Melaminformaldehyd, Ligninsulfonat oder Polykarboxylate. Umfassende Untersuchungen der Auswirkungen dieser Stoffe sind in NTB 03-09 beschrieben. Es zeigte sich, dass einige dieser Betonzusatzmittel wie Glukonat und Ligninsulfonat die Sorption von Eu(III) und Th(IV) stark verringern. Aufgrund der ausgeprägten Sorption der Betonzusatzmittel auf dem Zement kommt die Nagra jedoch wie im Fall von ISA zum Schluss, dass ihr Einfluss auf

die Sorptionsdaten vernachlässigbar ist. In NTB 03-09 wird ein Prüfverfahren vorgeschlagen, mit dem neue in Betracht kommende Betonzusatzmittel bezüglich negativer Einflüsse auf die Mobilität von Radionukliden im Zement getestet werden können.

Untersuchungen zum Abbau von Bitumen ergaben Oxalat als hauptsächliches Abbauprodukt, dessen Lösungskonzentration wegen der Bildung eines Kalziumsalzes limitiert ist. Im Weiteren sind die Oxalatkomplexe nicht von sehr grosser Stabilität, weshalb die Nagra ihren Einfluss auf die Speziation der Radionuklide als vernachlässigbar betrachtet (NTB 02-20).

Zur Abschätzung des potentiellen Effekts der unspezifizierten Komplexbildner machte die Nagra zwei extreme Annahmen. Sie ging davon aus, es handle sich bei den unspezifizierten Komplexbildnern einerseits ausschliesslich um EDTA, andererseits ausschliesslich um Berliner Blau, $\text{Fe}^{\text{III}}_4[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]_3$. EDTA ist ein starker Komplexbildner, der gemäss Nagra jedoch keinen negativen Effekt auf die Mobilität der Radionuklide ausüben würde. Einzig im Falle von Berliner Blau konnte die Nagra einen Einfluss auf die Speziation von Co(II) und Ni(II) wegen der Bildung von Cyanokomplexen nicht ganz ausschliessen, erachtete einen solchen aber nicht als sicherheitsrelevant (Schwyn et al. 2004).

Die Abbauprodukte von Polymeren wie etwa Polyethylen oder PVC beurteilte die Nagra aufgrund der Abklärungen in NTB 96-04 ebenfalls als nicht sicherheitsrelevant. Ein gewisser Einfluss auf die Löslichkeit von Radionukliden wurde beim alkalischen Abbau von PVC beobachtet; dieser ist aber im Vergleich zum Einfluss der Zellulose-Abbauprodukte unbedeutend.

Beurteilung der HSK

Die Abklärungen in NTB 93-08 und NTB 96-04 zeigen, dass bezüglich Organika das Hauptaugenmerk auf den Abbau von Zellulose gerichtet werden muss. In verschiedenen experimentellen Studien waren teilweise sehr grosse Löslichkeitserhöhungen von Actiniden in Zementwasser gemessen worden. Die umfangreichen Untersuchungen am PSI zum Abbau von Zellulose und zum Einfluss der Abbauprodukte auf die Sorption im Zement (NTB 97-04 und NTB 03-08) zeigen die Abbaumechanismen auf und geben Aufschluss über die Vorgänge bei der Komplexbildung des Abbauprodukts ISA mit den Modellkationen Ni(II), Eu(III) und Th(IV). In stark alkalischem Milieu können die Hydroxygruppen von ISA mit Metallkationen reagieren, was zu Komplexen von sehr grosser Stabilität führt. Ausländische Studien bestätigen und ergänzen diese Erkenntnisse.

Die HSK stimmt mit dem PSI und der Nagra überein, dass die Komplexbildung trotzdem kaum zu einer nennenswerten Verminderung der Sorption der Metallionen führt, weil ISA stark auf Zement sorbiert und deshalb nur sehr wenig ISA in Lösung verbleibt. Zudem ist anzunehmen, dass neben ISA auch die ISA-Komplexe auf Zement sorbieren. Die in NTB 03-08 präsentierten Messungen des Zellulose-Abbaus bei 90°C deuten im Weiteren darauf hin, dass ISA über längere Zeit in kurzkettige Karbonsäuren umgewandelt wird, die wegen des verminderten Chelateffekts weniger stabile Metallkomplexe erwarten lassen als ISA. Die Annahme der Nagra, dass Zellulose-Abbauprodukte keinen nennenswerten Einfluss auf die Mobilität der Radionuklide haben, ist unter diesen Gesichtspunkten korrekt.

Kleine Unsicherheiten bestehen noch: In NTB 97-04 wurde festgestellt, dass die Abbauprodukte unreiner Zellulosematerialien einen stärkeren Einfluss auf die Sorption von Ni(II) haben können als ISA. Eine Überprüfung dieses Sachverhalts wäre für das Verständnis der

Vorgänge wertvoll, weil Ni(II) als Modellkation für Metallionen der Oxidationsstufe +II verwendet wird. Allerdings ist dies für die Sicherheitsanalyse nicht direkt von Belang, da die Nagra im Zement nicht mit einer Sorption von Ni(II) und seinen Homologen rechnet.

Betonzusatzmittel weisen unterschiedliche Tendenzen zur Komplexbildung auf, wie die Nagra in NTB 03-09 experimentell gezeigt hat. Naturgemäss sorbieren sie stark auf Zement, denn ihre Funktion besteht im Allgemeinen in der Veränderung der Oberflächeneigenschaften der Zementkörner. Daher ist ihre Konzentration im Zementwasser gering, und die Annahme der Nagra, dass ihr potentiell mobilisierender Effekt auf gewisse Radionuklide vernachlässigbar ist, beurteilt die HSK als plausibel.

Als Abbauprodukte von Bitumen wurden von Van Loon und Kopajtic (1991) ausschliesslich Karbonsäuren identifiziert. Diese bilden mit Metallionen Komplexe, die jedoch bei hohen pH-Werten gegenüber den Hydroxokomplexen nicht konkurrenzfähig sind. Ein Einfluss auf die Radionuklidmobilität ist daher nicht zu erwarten, womit die Annahme der Nagra bestätigt werden kann.

Der Einfluss von EDTA auf die Sorption von Metallionen wurde am PSI aufgrund der Komplexstabilitäten abgeschätzt. Dabei wurde festgestellt, dass eine Reduktion der Sorption erst ab EDTA-Konzentrationen von $10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$ zu erwarten ist (NTB 93-08). Die hypothetisch maximale EDTA-Konzentration in Abfallsorten mit unspezifizierten Komplexbildnern liegt mit $1.1 \cdot 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$ (WA-COG-6) bzw. $1.6 \cdot 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$ (WA-COG-6A) deutlich unter der genannten Schwellenkonzentration (Schwyn et al. 2004). Auch wenn angenommen wird, bei den unspezifizierten Komplexbildnern handle es sich ausschliesslich um Berliner Blau, ist eine Komplexierung wegen der geringen Menge an potentiell vorliegendem Cyanid nicht zu erwarten. Im Gegensatz dazu ist in der Abfallsorte WA-COG-2 wesentlich mehr Cyanid in Form von $\text{Ni}_2[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]$ vorhanden. Diese Abfallsorte wird jedoch im Lagertunnel für LMA-2 eingelagert. Für LMA-2 nimmt die Nagra an, die Löslichkeiten von Co und Ni seien unbegrenzt hoch (Tabelle 4.6-2). Die HSK erachtet das Vorgehen der Nagra als nachvollziehbar und hat dazu keine Einwände anzubringen.

4.6.4 Chemische Bedingungen

Die maximalen Löslichkeiten und die Sorptionskoeffizienten der Radionuklide werden massgeblich durch die chemischen Bedingungen des Umfelds bestimmt. Die chemischen Eigenschaften von Zement unterscheiden sich drastisch von denen anderer Mineralien, insbesondere denen in Tongesteinen. Bei der Zementbildung kristallisieren während der Aushärtungsphase unter Abscheidung von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Portlandit) Hydrate von Ca-Silikaten und -Aluminaten aus, die unter alkalischen Bedingungen stabil sind. Im frischen Zement sind zudem bedeutende Mengen an Alkalihydroxiden vorhanden, die für den anfänglich sehr hohen Porenwasser-pH von etwa 13.5 verantwortlich sind.

Angaben der Nagra

Die zeitliche Entwicklung des Zement-Nahfelds wurde von der Nagra eingehend studiert (NTB 90-12 und NTB 94-03). Sie kann in drei Phasen eingeteilt werden: In der ersten Phase (von der Nagra auch als „Region I“ bezeichnet) diffundiert lösliches Hydroxid ins Wirtgestein, wodurch der pH-Wert des Zementwassers kontinuierlich abnimmt, bis ein Wert von 12.5 erreicht ist. Die Anwesenheit grosser Mengen an Portlandit verhindert ein weiteres Absinken des pH-Wertes. Der deutlich tiefere pH-Wert im Grundwasser des Wirtgesteins wird zu einer

weiteren Diffusion von Hydroxid-Ionen ins Fernfeld und damit zu einer kontinuierlichen, jedoch sehr langsamen Auflösung von Portlandit führen, während welcher der pH-Wert in der Verfüllung jedoch konstant bleibt (zweite Phase bzw. „Region II“).

Der Übergang zur dritten Phase („Region III“) tritt ein, sobald aller Portlandit aufgebraucht ist. Der pH-Wert wird dann sinken, womit die Ca-Silikat-Hydrate (CSH-Phasen) instabil werden und sich in andere Phasen umwandeln. Der Zement wird damit seine Eigenschaften verlieren. Die Nagra bezeichnete die Region II der Zementdegradierung als repräsentativ für die chemische Situation im Nahfeld. Im Porenwassermodell wurde Opalinuston-Grundwasser mit den Festphasen Portlandit, Kalzit (CaCO_3), Brucit (Mg(OH)_2) und Fluorit (CaF_2) ins Gleichgewicht gebracht. Ettringit (ein Ca-Al-Sulfat-Hydrat), Hydrogranat (Ca-Al-Hydrat) und die Kalzium-Silikat-Hydrat-Phase wurden ebenfalls berücksichtigt. Dies führte, unter Anpassung der Silikat-Konzentration an experimentell beobachtete Werte, zur Zusammensetzung des Referenz-Porenwassers in Tabelle 4.6-1.

Tabelle 4.6-1: Chemische Zusammensetzung des Porenwassers im Zement-Nahfeld gemäss NTB 02-22. Die Konzentrationen sind in $[\text{mol dm}^{-3}]$ angegeben.

	Referenz-Zementwasser ⁽¹⁾ (LMA-1)	Frisches Zementwasser ⁽²⁾ (LMA-1)	Oxidierendes Zementwasser (LMA-2)
pH	12.55	13.44	12.52
Eh [mV]	−230 ⁽³⁾	−430 ⁽⁴⁾	+350
Ionenstärke $[\text{eq dm}^{-3}]$	0.224	0.374	0.722
Na	$1.69 \cdot 10^{-1}$	$1.01 \cdot 10^{-1}$	$6.69 \cdot 10^{-1}$
K	$5.7 \cdot 10^{-3}$	$3.03 \cdot 10^{-1}$	$5.7 \cdot 10^{-3}$
Ca	$2.009 \cdot 10^{-2}$	$8.43 \cdot 10^{-4}$	$2.009 \cdot 10^{-2}$
Mg	$1.126 \cdot 10^{-7}$	$1.30 \cdot 10^{-8}$	$1.126 \cdot 10^{-7}$
Al	$5.0 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5.0 \cdot 10^{-6}$
CO_3	$9.74 \cdot 10^{-6}$	$2.04 \cdot 10^{-4}$	$9.74 \cdot 10^{-6}$
SO_4	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$7.5 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$
Cl	$1.6 \cdot 10^{-1}$	-	$1.6 \cdot 10^{-1}$
F	$1.042 \cdot 10^{-4}$	$7.6 \cdot 10^{-4}$	$1.042 \cdot 10^{-4}$
Si	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$
NO_3	-	-	$5 \cdot 10^{-1}$

⁽¹⁾ Zusammensetzung entspricht der zweiten Phase.

⁽²⁾ Zusammensetzung entspricht der ersten Phase.

⁽³⁾ Die Nagra berücksichtigt im Referenzfall einen Eh-Variationsbereich bis −750 mV.

⁽⁴⁾ Die Nagra berücksichtigt für frisches Zementwasser einen Eh-Variationsbereich bis −790 mV.

Die Nagra sah es als wahrscheinlich an, dass das Redoxpotential durch Korrosionsprodukte von Eisen bestimmt wird und nahm an, dass der Magnetit redoxbestimmend wirkt. Zudem

nahm die Nagra aufgrund von Messungen zum Abbau von Zement an, dass die totale Fe(III)-Konzentration höchstens $10^{-7} \text{ mol dm}^{-3}$ beträgt (NTB 02-13). Aus diesen Vorgaben ergibt sich ein maximaler Eh-Wert von -230 mV . Wären andere Eisenphasen Redox-bestimmend, würden sich Eh-Werte bis -750 mV ergeben (NTB 02-13). Die Nagra hat deshalb für den Referenzfall eine Eh-Spanne von -750 mV bis -230 mV berücksichtigt.

Wegen der sehr geringen hydraulischen Leitfähigkeit von Opalinuston erwartet die Nagra nicht, dass die dritte Phase im für die Sicherheitsanalyse massgeblichen Zeitraum erreicht werden kann und berücksichtigte diese Evolutionsphase daher nicht. Sie bemerkte jedoch, dass die erste Phase der Zementdegradierung wegen des geringen Wasserflusses im Opalinuston sehr lange (Tausende von Jahren) andauern und daher für die anfängliche Freisetzung von Radionukliden ebenfalls von Bedeutung sein könnte. Daher wurde ein Wasser für die erste Phase definiert, das frischem Zementwasser entspricht und einen pH-Wert von 13.44 aufweist (NTB 03-06). Bei Elementen, die in frischem Zementwasser und im Referenz-Porenwasser unterschiedliche Löslichkeiten oder Sorptionskoeffizienten aufweisen, wurde dies entsprechend berücksichtigt. Die Nagra ging beim frischen Zementwasser von einer Eh-Spanne von -790 mV bis -430 mV aus.

Für den Lagertunnel LMA-2, der relativ grosse Mengen Nitrat enthält, wurde zusätzlich ein oxidierendes Porenwasser definiert, das sich in der NaNO_3 -Konzentration sowie im Eh-Wert, der mit $+350 \text{ mV}$ angenommen wurde, vom Referenz-Porenwasser unterscheidet. Damit wurde die Möglichkeit einer bakteriell katalysierten Reduktion von Nitrat berücksichtigt. Die Nagra betrachtete diesen Wert als obere Limite, erachtete aber einen Eh-Bereich ähnlich wie in den Lagertunneln LMA-1 als wahrscheinlicher.

Beurteilung der HSK

Die Zusammensetzungen des Referenz-Zementwassers und des frischen Zementwassers sind nachvollziehbar und entsprechen dem aktuellen Wissensstand. Die erste Phase ist durch den hohen Gehalt an löslichen Alkalihydroxiden gekennzeichnet. Durch diffusiven Austausch von Wasserinhaltsstoffen zwischen Nahfeld und Wirtgestein wird sich die Zusammensetzung des Nahfeldwassers kontinuierlich ändern, bis der pH-Wert etwa 12.5 erreicht hat (Anfang der zweiten Phase) und das Gleichgewicht mit Portlandit kein weiteres Absinken mehr zulässt. Weitere Festphasen wie Brucit, Ettringit und Kalzit kontrollieren die Konzentrationen der meisten wichtigen Wasserinhaltsstoffe. Das Porenwasser der zweiten Degradierungsphase hat daher eine robuste Zusammensetzung, die kaum nennenswerten Schwankungen unterworfen ist. Dieses Degradierungsmodell ist in Übereinstimmung mit einer Vielzahl von Auslaugversuchen und entspricht dem internationalen Wissensstand.

Den Entscheid der Nagra, das Wasser der zweiten Degradierungsphase als Referenz-Porenwasser für das Zement-Nahfeld zu verwenden, erachtet die HSK als fraglich. Gemäss Nagra müsste das gesamte Porenwasser des Zementnahfelds zehnmals durch Grundwasser aus dem Opalinuston ausgetauscht werden, bis die zweite Phase mit einem pH-Wert von 12.5 erreicht ist. Aufgrund der extrem geringen Wasserdurchlässigkeit des Opalinustons und des inhomogenen Verlaufs des Wasseraustausches erwartet die HSK sehr lange Zeiträume, bis ein Grossteil der Zementverfüllung die zweite Phase erreicht hat. Die Nagra hat jedoch auch das frische Zementwasser der ersten Phase bei der Herleitung der geochemischen Daten berücksichtigt, womit der mögliche Variationsbereich des Nahfeldwassers genügend abgedeckt ist. Der Entscheid der Nagra, die dritte Degradierungsphase (kein Portlandit mehr

vorhanden, Auflösung der CSH-Phasen) nicht zu berücksichtigen, ist nachvollziehbar und vertretbar, da die grossen Mengen an Portlandit ein chemisch stabiles Nahfeld über einen sehr langen Zeitraum garantieren.

Für das Redoxpotential hat die Nagra verschiedene Berechnungen durchgeführt (NTB 02-13). Es bestehen hier grosse Ungewissheiten, die sich im breiten Variationsbereich widerspiegeln, der schliesslich angegeben wurde. Der Eh-Wert von -230 mV für das Referenz-Zementwasser, basierend auf dem thermodynamisch stabilen Magnetit und der Fe(III)-Konzentration im Zement, ist nachvollziehbar. Mit der Wahl einer Eh-Spanne für das Referenz-Zementwasser mit dem unteren Limit von -750 mV (-790 mV für das frische Zementwasser mit $\text{pH} = 13.44$) ist die Nagra auf der sicheren Seite, weil sie bei Redoxsensitiven Elementen jeweils die ungünstigsten Werte für die maximalen Löslichkeiten und die Sorptionskoeffizienten aus dieser Spanne wählte. Im Fall von LMA-2 ist die Sache komplexer, weil das potentielle Oxidationsmittel Nitrat in grossen Mengen vorhanden ist. Die Nagra hat den sicheren Weg gewählt und die mögliche mikrobielle Reduktion von Nitrat berücksichtigt. Damit wird der potentielle Eh-Bereich für LMA-2 von -750 mV bis $+350$ mV geschätzt, was beinahe der gesamten theoretisch möglichen Eh-Bandbreite des Wassers bei $\text{pH} = 12.5$ entspricht.

Die Wasserzusammensetzungen in Tabelle 4.6-1 gelten für eine Temperatur von 25°C . Die Temperatur in der Zementverfüllung liegt hingegen bei 50°C . Bei dieser Temperaturdifferenz ist ein Einfluss auf die Porenwasserchemie und die damit zusammenhängenden maximalen Löslichkeiten und K_d -Werte der Radionuklide denkbar, ohne dass jedoch eine entscheidende Auswirkung auf die Sicherheit des Tiefenlagers zu erwarten ist.

4.6.5 Löslichkeiten der Radionuklide

Viele chemische Elemente sind in wässrigen Lösungen nur begrenzt löslich. Bilden Radionuklide im Nahfeld aufgrund der chemischen Zusammensetzung des Porenwassers schwerlösliche Festphasen, kann sich ihre Ausbreitung stark verzögern. Wichtige löslichkeitsbestimmende Parameter sind in vielen Fällen der pH-Wert, das Redoxpotential und die Karbonat-Konzentration. Durch den hohen pH-Wert von 12.5 unterscheidet sich das Zementwasser drastisch von natürlichen Wässern. Die heutige Kenntnis des chemischen Verhaltens unter diesen Bedingungen ist bei vielen Elementen mangelhaft. Systematische Untersuchungen sind oft erst im Zusammenhang mit Machbarkeitsstudien für Tiefenlager für radioaktive Abfälle eingeleitet worden. Die für die Berechnung maximaler Löslichkeiten im Zementwasser notwendigen thermodynamischen Daten sind bei einigen Elementen nur unvollständig vorhanden. In solchen Fällen können Analogien und Extrapolationen weiter helfen, doch muss stets ein genügend grosser Sicherheitsfaktor eingebaut werden.

Angaben der Nagra

Für die maximalen Löslichkeiten im LMA-Nahfeld hat die Nagra für jedes Element einen Referenzwert, sowie einen oberen und einen unteren Grenzwert (*Upper Limit* und *Lower Limit*) für den Variationsbereich definiert, sowohl für die Lagertunnel LMA-1 als auch für den Lagertunnel LMA-2 (Tabelle 4.6-2). Die Daten wurden am PSI hergeleitet und sind in NTB 02-22 ausführlich dokumentiert. Die in den Berechnungen verwendeten thermodynamischen Daten stammen aus der Nagra/PSI Datenbank (NTB 02-16). Die oberen und unteren Grenzwerte wurden, wenn möglich, durch Fehlerfortpflanzung in den verwendeten thermo-

dynamischen Daten berechnet. In Fällen, wo dies aus Mangel an Daten nicht möglich war, wurden Schätzwerte verwendet.

Als löslichkeitsbestimmende Festphasen wurden in den Fällen von Co, Ni, Zr, Eu, Pb, Th, Np, Pu und Am die Metalloxide oder -hydroxide verwendet, bei Sr das Karbonat und bei Ra das Sulfat. Bei Se, Mo und Sn wurden ternäre Verbindungen mit Erdalkalitionen als löslichkeitsbestimmende Festphasen eingesetzt. Die berechnete Löslichkeit von Se zeigt eine starke Abhängigkeit vom Redoxpotential und steigt sowohl bei tiefen (< -450 mV) als auch bei hohen Eh Werten ($> +50$ mV) stark über den Referenzwert hinaus an. Die für Eu berechneten maximalen Konzentrationen wurden auch für Sm und Ac verwendet. Am diente als Analogon für Cm. Bei Pa konnte die Löslichkeit wegen Datenmangels nur grob abgeschätzt werden. Die von der Nagra gewählte maximale Konzentration von Uran stützte sich weitgehend auf eine experimentelle Analyse des Phasendiagramms im System $\text{CaO-SiO}_2\text{-UO}_3\text{-H}_2\text{O}$ bei 85°C von Moroni und Glasser (1995). Diese fanden U(VI)-Konzentrationen im Bereich von 10^{-8} bis 10^{-7} mol dm^{-3} in Gegenwart von Portlandit. Die Nagra stellte in NTB 02-22 fest, dass die tiefsten Konzentrationen ($< 10^{-9}$ mol dm^{-3}) in Systemen mit tiefem U-Gehalt (10 %) und in Gegenwart von CSH-Gel gemessen wurden, und dass der U-Gehalt in den Abfallmatrizen des LMA-Lagers noch wesentlich tiefer sein müsse. Daraus schloss sie, dass die U-Konzentration im Zementporenwasser nicht grösser als 10^{-8} mol dm^{-3} sein könne.

In Lösung dominieren gemäss den Berechnungen am PSI wegen des hohen pH-Wertes des Zementwassers durchwegs die Hydroxokomplexe. Einzige Ausnahmen sind die stabilen Anionen SeO_3^{2-} und MoO_4^{2-} , sowie die nicht hydrolysierenden Kationen Sr^{2+} und Ra^{2+} .

Die Konzentration von C_{inorg} , das als Karbonat vorliegt, wird durch das Gleichgewicht mit CaCO_3 bestimmt und ist durch die Zusammensetzung des Porenwassers gegeben. H, C_{org} (organischer Kohlenstoff), Cl, I, Cs, Nb, Tc und Po haben eine hohe Löslichkeit, weshalb keine Löslichkeitslimiten festgelegt wurden.

Für den Lagertunnel LMA-2 hat die Nagra ein oxidierendes Porenwasser definiert (Tabelle 4.6-2). Für diesen Fall hob sie die Löslichkeitslimiten für die Elemente Co, Ni, Se und Np auf, während sie diejenige von Pu leicht erhöhte. Gründe sind die Anwesenheit von $\text{Ni}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ im LMA-2 und die damit verbundene Möglichkeit der Bildung von Cyanidkomplexen (Co, Ni), sowie die Möglichkeit der Einstellung oxidierender Bedingungen (Se, Np, Pu).

Beurteilung der HSK

Die HSK hat für jedes Element den Referenzwert, den oberen Grenzwert und den Wert für oxidierende Bedingungen (LMA-2) überprüft (HSK 35/86). Die unteren Grenzwerte wurden von der Nagra für die probabilistischen Analysen benötigt und sind von der HSK nicht überprüft worden, da sie weniger sicherheitsrelevant sind. In Tabelle 4.6-2 sind die von der HSK verwendeten maximale Löslichkeiten aufgelistet und den Werten der Nagra gegenübergestellt.

Tabelle 4.6-2: Maximale Löslichkeiten in $[\text{mol dm}^{-3}]$ im Zement-Porenwasser (Nahfeld LMA). Die chemische Zusammensetzung des Porenwassers ist in Tabelle 4.6-1 aufgeführt. Als *Upper Limit* wird der pessimistische obere Grenzwert für die maximale Löslichkeit bezeichnet. Die Bezeichnung „hoch“ bedeutet, dass eine unlimitierte Löslichkeit angenommen wird. HSK-Werte, die von den Nagra-Werten abweichen, sind **fett gedruckt**.

Element	Referenzwert Nagra	Referenzwert HSK	<i>Upper Limit</i> Nagra	<i>Upper Limit</i> HSK	Oxidierende Bedingungen ⁽¹⁾ (LMA-2)
H	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
C _{inorg}	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
C _{org}	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Cl	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Co	$7 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	hoch
Ni	$3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	hoch
Se	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	hoch	hoch
Sr	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Zr	$6 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6}$
Nb	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Mo	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Tc	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Sn	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$
I	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Cs	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Sm	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Eu	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Pb	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	hoch	hoch	$3 \cdot 10^{-3}$
Po	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Ra	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Ac	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Th	$3 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-9}$
Pa	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	hoch	hoch	$1 \cdot 10^{-8}$
U	$1 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-8}$ ⁽²⁾
Np	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	hoch
Pu	$4 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-11}$ ⁽³⁾
Am	$2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$
Cm	$2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$

⁽¹⁾ Tabelliert sind die Werte der Nagra. Einzig im Falle von U zieht die HSK einen höheren Wert vor, siehe Fussnote ⁽²⁾.

⁽²⁾ Die HSK verwendet $5 \cdot 10^{-7} \text{ mol dm}^{-3}$.

⁽³⁾ Die Nagra verwendet als *upper limit* $6 \cdot 10^{-10} \text{ mol dm}^{-3}$.

Die Herleitung und Selektion der maximalen Löslichkeiten ist in allen Fällen nachvollziehbar und in den meisten Fällen plausibel. Die HSK hat keine Einwände zu den von der Nagra verwendeten maximalen Löslichkeiten anzubringen, mit Ausnahme von Se, Zr, Ra und U, die nachfolgend besprochen werden. Trotz der Lücken in den Datensätzen gibt es nur wenige Unwägbarkeiten, die sich auf generell schlecht untersuchte Elemente wie Nb, Po und Pa beschränken. In diesen Fällen hat die Nagra jeweils – zumindest für die oberen Grenzwerte – keine Löslichkeiten festgelegt.

Mit $\text{CaSeO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ als löslichkeitsbestimmender Festphase wurde die maximale Konzentration von Se auf $1 \cdot 10^{-5} \text{ mol dm}^{-3}$ geschätzt. In frischem Zementwasser würde sich die Se-Löslichkeit wegen der geringeren Ca-Konzentration auf $7 \cdot 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$ erhöhen. Dieser Wert wurde von der Nagra als oberer Grenzwert bezeichnet. Die HSK hält dem entgegen, dass auch die starke Abhängigkeit der Se-Löslichkeit vom Redoxpotential zu berücksichtigen ist. Nach NTB 02-22 kann die Se-Löslichkeit bei Eh-Werten unterhalb -450 mV wegen der Reduktion zu $\text{Se}(-\text{II})$ deutlich über den Referenzwert ansteigen. Die HSK zieht es daher vor, keinen oberen Grenzwert festzulegen.

Das vom PSI verwendete Modell für die maximale Löslichkeit von Zr von $6 \cdot 10^{-6} \text{ mol dm}^{-3}$ beruht auf dem Gleichgewicht zwischen monoklinem ZrO_2 (Baddeleyit) und dem Hydroxokomplex $\text{Zr}(\text{OH})_5^-$. Experimentelle Löslichkeitsmessungen wurden in konzentrierter Lauge und neutralen Lösungen durchgeführt, fehlen aber vollständig im pH-Bereich von 9 bis 14. Die Nagra hat die *upper limit* daher um 10 erhöht. Die HSK findet jedoch einen Unsicherheitsfaktor von 100 angebracht und schlägt als oberen Grenzwert eine maximale Zr-Konzentration von $6 \cdot 10^{-4} \text{ mol dm}^{-3}$ vor.

Für Ra schätzte die Nagra eine maximale Löslichkeit von $1 \cdot 10^{-5} \text{ mol dm}^{-3}$, basierend auf dem Gleichgewicht mit RaSO_4 . Die Nagra erwartet, dass Ra in diverse Festphasen eingebaut wird, wodurch seine Konzentration wesentlich tiefer liegen könnte als angenommen (NTB 02-22). Andererseits kann Sulfat zu Sulfid reduziert werden und die Grundlage für das Löslichkeitsgleichgewicht mit RaSO_4 in Frage stellen. Wie bedeutend ein reduktiver Sulfatentzug sein kann, und ob sich die Ra-Konzentration dadurch wesentlich erhöhen würde, ist schwer zu sagen. Die HSK ist der Meinung, dass sich der obere Grenzwert wegen dieser Ungewissheit auf das Gleichgewicht mit RaCO_3 abstützen sollte, was zu einer maximalen Konzentration von $2 \cdot 10^{-2} \text{ mol dm}^{-3}$ führt.

In der von der Nagra verwendeten Studie von Moroni und Glasser (1995) wurden U-Konzentrationen im System $\text{CaO-SiO}_2\text{-UO}_3\text{-H}_2\text{O}$ gemessen. Die Autoren nannten die gemessenen Konzentrationen *uranium solubilities*, doch es geht aus ihrer Publikation nicht hervor, ob diese Konzentrationen auf Lösungsgleichgewichten beruhen. Insbesondere die Systeme, die CSH-Gel enthielten, sind wegen der mit Sicherheit auftretenden Sorptionsvorgänge als Referenzsysteme problematisch. Die HSK bevorzugt als maximale Uran-Löslichkeit die mit $\alpha\text{-Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$ als Festphase berechnete Uran-Konzentration von $5 \cdot 10^{-7} \text{ mol dm}^{-3}$. Da eine experimentelle Bestätigung dieses Wertes noch aussteht, setzt die HSK den oberen Grenzwert um den Faktor 100 höher als den Referenzwert.

4.6.6 Sorptionskoeffizienten der Radionuklide

Radionuklide, die aus der Abfallmatrix ins Porenwasser des Zements gelangen, können am Zement sorbieren, indem sie mit den Porenoberflächen des Zements Wechselwirkungen ein-

gehen. Die Art dieser Wechselwirkungen hängt von der chemischen Beschaffenheit der Oberfläche ab und kann für verschiedene Radionuklide unterschiedlich sein. Die chemische Beschaffenheit und Reaktivität der Zementoberflächen ist noch nicht zufrieden stellend untersucht worden. Aus Sorptionsmessungen lässt sich jedoch schliessen, dass Oberflächen-Oxidgruppen chemische Bindungen mit zahlreichen Metallionen eingehen können, Sorption durch Ionenaustausch im Zement hingegen nur in sehr beschränktem Ausmass stattfindet.

Angaben der Nagra

Der von der Nagra verwendete Sorptionsdatensatz enthält sowohl für LMA-1 wie für LMA-2 einen Referenzwert mit unterem und oberem Grenzwert für den Variationsbereich. Die K_d -Werte für die Abfallklasse LMA-2 unterscheiden sich nur im Fall von Se, Np und Pu von denen der Abfallklasse LMA-1. Die Herleitung der Daten ist in NTB 02-20 beschrieben und gründet zum Teil auf den früheren Berichten NTB 93-08 und NTB 96-04. Die von der Nagra verwendeten Sorptionskoeffizienten sind in Tabelle 4.6-3 aufgeführt.

Im Auftrag der Nagra wurden am PSI Sorptionsmessungen auf ausgehärtetem Zement für die Elemente Cs(I), Sr(II), Ni(II), Eu(III), Th(IV) und Sn(IV) durchgeführt (NTB 02-20). Dabei wurde ein synthetisches Zementwasser mit $\text{pH} = 13.3$ verwendet, das etwa dem frischen Zementwasser entspricht (erste Degradierungsphase). Die Zusammensetzungen der in Tabelle 4.6-1 aufgeführten Zementwässer wurden zu einem späteren Zeitpunkt definiert, was den geringen Unterschied im pH-Wert erklärt. Bei vielen Radionukliden ändert sich die Speziation im pH-Bereich von 12.5 bis 13.5 kaum, und die gemessenen K_d -Werte gelten in diesem Bereich für jeden pH-Wert. Wo dies nicht der Fall ist, hat die Nagra die Werte entsprechend angepasst. In den meisten Fällen wurde die Sorption bei unterschiedlichen fest/flüssig-Verhältnissen gemessen, die naturgemäss sehr klein waren, gemessen an der Situation im Nahfeld. Die Nagra ortete aufgrund der Messungen keine systematische Abhängigkeit der K_d -Werte vom fest/flüssig-Verhältnis und erachtete die K_d -Werte aus Batch-Versuchen generell als übertragbar auf intakten Zement.

Im Fall von Strontium verwendete die Nagra nicht den am PSI gemessenen K_d -Wert von $0.1 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$, sondern den tieferen Wert von $0.001 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$, der aus NTB 93-08 stammt und mit der Beobachtung von Johnston und Wilmot (1992) vereinbar ist, dass Sr in verschiedenen Portland-Rezepturen rund halb so schnell diffundiert wie Cs.

Für Europium verwendete die Nagra den hohen Wert von $K_d = 80 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$. Dieser Wert wurde auch für ein weiteres Lanthanid (Sm) sowie für die dreiwertigen Actiniden (Ac, Am, Cm) verwendet. Denselben Wert erhielt die Nagra für Thorium und verwendete ihn unter der Annahme eines analogen chemischen Verhaltens auch für die Elemente Np(IV) und Pu(IV).

Zinn liegt im Zement als Sn(IV) vor. Basierend auf Messungen am PSI wählte die Nagra den Wert $K_d = 10 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$. Dieser wurde unverändert auch für Zr(IV) verwendet. Diese Analogie wurde unter anderem damit begründet, dass beide Elemente in vierwertiger Form vorliegen, und dass im Zementwasser jeweils anionische Hydroxokomplexe als dominante Lösungsspezies auftreten.

Tabelle 4.6-3: Sorptionskoeffizienten in $[m^3 kg^{-1}]$ im Zement (Nahfeld LMA). Die chemische Zusammensetzung des Porenwassers ist in Tabelle 4.6-1 aufgeführt. Als *Lower Limit* wird der pessimistische untere Grenzwert des Sorptionskoeffizienten bezeichnet. Die Werte gelten für die Abfallklassen LMA-1 und LMA-2, sofern in der letzten Spalte nichts anderes vermerkt ist. HSK-Werte, die von den Nagra-Werten abweichen, sind **fett gedruckt**.

Element	Referenzwert Nagra	Referenzwert HSK	<i>Lower Limit</i> Nagra	<i>Lower Limit</i> HSK	Oxidierende Bedingungen ⁽¹⁾ (LMA-2)
H	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	
C _{inorg}	0	0	0	0	
C _{org}	0	0	0	0	
Cl	0.005	0.005	0.003	0	
Co	0	0	0	0	
Ni	0	0	0	0	
Se	0.03	0.03	0.02	0	0.001 ⁽²⁾
Sr	0.001	0.001	$7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	
Zr	10	10	2	0.1	
Nb	1	1	0.7	0.1	
Mo	0	0	0	0	
Tc	0.001	0.001	$7 \cdot 10^{-4}$	0	
Sn	10	10	2	1	
I	0.001	0.001	$7 \cdot 10^{-4}$	0	
Cs	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	
Sm	80	20	20	1	
Eu	80	20	20	1	
Pb	0.5	0.5	0.3	0.005	
Po	0	0	0	0	
Ra	0.05	0.05	0.03	$1 \cdot 10^{-4}$	
Ac	80	20	20	1	
Th	80	5	20	0.5	
Pa	0.1	0.1	0.07	0.01	
U	2	2	1	0.1	
Np	80	5	20	0.1	0.1 ⁽³⁾
Pu	80	5	20	0.1	0.1 ⁽³⁾
Am	80	20	20	1	
Cm	80	20	20	1	

⁽¹⁾ Tabelliert sind die Referenzwerte der Nagra, falls sie sich vom Referenzwert für LMA-1 unterscheiden.

⁽²⁾ Für die *Lower Limit* wählte die Nagra $7 \times 10^{-4} m^3 kg^{-1}$, die HSK den Wert Null.

⁽³⁾ Für die *Lower Limit* wählte die Nagra $0.07 m^3 kg^{-1}$, die HSK $0.01 m^3 kg^{-1}$.

Die Sorption und Diffusion von tritiiertem Wasser (HTO) wurde kürzlich von Tits et al. (2003) am PSI gemessen (siehe auch NTB 02-15). Aus der Auswertung der Diffusionsmessungen ergab sich ein K_d -Wert, der mit demjenigen aus den separaten Batch-Sorptionsmessungen sehr gut übereinstimmt.

Die Werte für Cl(-I), Sr(II), Nb(V), Tc(VII), I(-I), Pb(II), Ra(II) und U(IV) basieren auf Literaturdaten, diejenigen für Se auf unpublizierten Messungen am PSI. Für Pa(V) übernahm die Nagra den Wert von Np(V) für oxidierende Bedingungen (LMA-2).

Für Nickel verwendete die Nagra konservativerweise $K_d = 0$, da die Sorptionsmessungen am PSI wegen des Ni-Gehalts im Zement durch ein Löslichkeitsgleichgewicht kontrolliert waren und daher nicht die Sorptionsgleichgewichte widerspiegeln. $K_d = 0$ setzt die Nagra auch für Co (in Analogie zu Ni), sowie für C_{inorg} , C_{org} , Mo und Po.

Im Lagertunnel für die Abfallklasse LMA-2 nahm die Nagra wegen des hohen Nitratanteils oxidierende Bedingungen an (Tabelle 4.6-1), und modifizierte deswegen die K_d -Werte von Se, Np und Pu, indem sie hier von den Oxidationsstufen Se(VI), Np(V) und Pu(V) ausging. Der gewählte Wert für Se(VI) beruht auf einer Analogie mit Tc(VII). Die Werte für Np(V) und Pu(V) wurden so gewählt, dass sie sich zwischen den Werten für Sr(II) und Pb(II) bewegten, was mit der Ähnlichkeit der effektiven Ionenladungen begründet wurde.

Die unteren Grenzwerte wurden von der Nagra aus den geschätzten Ungewissheiten in Bezug auf Größen wie Zementmasse, Porenwasservolumen, Nuklidinventar, Inventar an stabilen Isotopen und der Löslichkeit im Zement-Porenwasser abgeleitet.

Beurteilung der HSK

Die HSK hat für jedes Element den Sorptionsreferenzwert, den unteren Grenzwert und die Werte für LMA-2 überprüft (HSK 35/88). Die oberen Grenzwerte wurden von der Nagra für die probabilistischen Analysen benötigt und sind von der HSK nicht überprüft worden, da sie weniger sicherheitsrelevant sind. In Tabelle 4.6-3 sind die von der HSK verwendeten K_d -Werte aufgelistet und den Werten der Nagra gegenübergestellt.

Die experimentellen Untersuchungen ergaben bei mehreren Elementen klare Hinweise auf eine sehr starke Aufnahme durch Zement. Die Beurteilung der Sorptionswerte wird dadurch erschwert, dass die Sorptionsmechanismen bei den hohen pH-Werten für viele Nuklide nicht bekannt sind. Insbesondere die Unterscheidung zwischen reversibler und irreversibler Sorption ist bei den stark sorbierenden Elementen aufgrund der momentanen Datenlage schwierig. Bei der Auswahl der K_d -Werte ging die Nagra jeweils von einer reversiblen Sorption aus und liegt damit auf der sicheren Seite.

Die Herleitung und Selektion der Sorptionsdaten ist nachvollziehbar. Die HSK hat nur zu wenigen, nachfolgend diskutierten Referenzwerten Einwände.

Im Fall von Eu(III) zeigen die in NTB 02-20 dargestellten Daten eine Abnahme des K_d -Wertes mit zunehmendem fest/flüssig-Verhältnis. Die Abnahme ist ausgeprägter bei den Messungen mit HTS-Zement (*Haute Teneur en Silice*) als bei den Experimenten mit der CSH-Phase. Die Autoren interpretierten dies als Streuung der Messwerte. Die HSK zieht jedoch eine konservativere Extrapolation der beiden Messreihen auf *in situ*-Bedingungen vor, was im Fall des HTS-Zements einen K_d -Wert von $20 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ ergibt. Die Analogie mit den weiteren Lanthaniden und den dreiwertigen Actiniden ist sinnvoll, weshalb derselbe Wert auch für Sm, Ac, Am und Cm verwendet wird.

Bei der Sorption von Th(IV) auf Zement kann eine Abhängigkeit des K_d -Wertes vom fest/flüssig-Verhältnis vorläufig ebenfalls nicht ausgeschlossen werden, wie die Messungen von Wieland et al. (2002) zeigen. Diese bei tiefen fest/flüssig-Verhältnissen durchgeführten Messungen ergaben K_d -Werte im Bereich von 100 bis $1000 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$, ältere Messungen von Allard et al. (1984) bei höheren fest/flüssig-Verhältnissen führten zu K_d -Werten zwischen 3 und $6 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$. Experimentelle Einschränkungen bei der Verwendung höherer fest/flüssig-Verhältnisse können die Resultate verfälschen und mögen die tieferen Werte erklären. Solange aber diese Unterschiede und der Einfluss des fest/flüssig-Verhältnisses nicht restlos geklärt sind, zieht die HSK den „alten“ K_d -Wert von $5 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ für Th(IV) vor. Dieser Wert stammt aus NTB 93-08 und entspricht einem früheren internationalen Konsens. Er wird nach wie vor auch im schwedischen Entsorgungsprogramm verwendet (NTB 03-06). Die Wahl von Th als Analogon für Np und Pu, die ebenfalls in der Oxidationsstufe +IV vorliegen, ist aufgrund der verfügbaren experimentellen Informationen vertretbar. Infolge der Korrektur des K_d -Wertes von Th verwendet die HSK für Np und Pu ebenfalls den K_d -Wert von $5 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$.

Bei der Herleitung der unteren Grenzwerte hat die Nagra nach Ansicht der HSK die Qualität der experimentellen Daten (z.B. die Streuung der Messwerte), den noch lückenhaften Stand des Wissens über die Mechanismen der Sorptionsvorgänge, sowie Ungewissheiten bei Analogien zu wenig berücksichtigt. Die HSK passt daher die unteren Grenzwerte aller Elemente ausser H entsprechend an.

Gegen die von der Nagra für die Abfallklasse LMA-2 (oxidierende Bedingungen) gewählten Referenzwerte von Se, Np und Pu hat die HSK nichts einzuwenden. Für Se übernahm die Nagra den Referenzwert von Tc. Die Analogie von Se(VI) mit Tc(VII) ist vertretbar, da es sich in beiden Fällen um stabile Anionen handelt (SeO_4^{2-} und TcO_4^-). Es liegen auch experimentelle Hinweise für die Sorption von Selenat auf Ettringit vor, siehe Ochs et al. (2002) sowie Baur und Johnson (2003). Die K_d -Werte für Np und Pu beziehen sich auf die Oxidationsstufe +V und sind ebenfalls vertretbar. Die Ungewissheit bezüglich Redoxpotential ist unkritisch, weil mit den benachbarten Oxidationsstufen +IV und +VI höhere Sorptionswerte verbunden wären. Die unteren Grenzwerte sind allerdings auch hier durchwegs zu optimistisch gewählt, siehe Anmerkungen in Tabelle 4.6-3.

Generell ist zu sagen, dass bezüglich des chemischen Verhaltens vieler Radionuklide bei den hohen pH-Werten des Zementwassers Kenntnislücken bestehen. Die Nagra hat diese Tatsache teilweise berücksichtigt; die HSK hat vorsichtshalber die unteren Grenzwerte zum Teil stark herabgesetzt. Wie die Berechnungen der HSK zeigen, stellt die Verwendung dieser bewusst konservativ gewählten unteren Grenzwerte den Sicherheitsnachweis jedoch nicht in Frage. Für das Verständnis des Verhaltens der Radionuklide in der Zementmatrix ist es jedoch wichtig, die unter diesen Bedingungen stattfindenden Gleichgewichtsreaktionen zu kennen. Die HSK empfiehlt, die notwendigen thermodynamischen Daten zu erheben, um die Ungewissheiten zu reduzieren.

4.6.7 Auswirkungen der Gasproduktion

Angaben der Nagra

Die Abfallgebinde in den LMA-Lagertunneln produzieren Gas auf der Basis von mehrheitlich drei Prozessen:

- Die Metallteile korrodieren zunächst unter aeroben, später anaeroben Bedingungen und setzen durch letzteren Prozess H_2 frei. Besondere Bedeutung hat hierbei die schnelle Gasproduktion bei der Korrosion von Aluminium- und Zink-Teilen.
- Das organische Material in den Behältern wird von Mikroorganismen unter Bildung von CH_4 und CO_2 abgebaut.
- Die radioaktive Strahlung führt zur Radiolyse von Wasser.

Das entstehende Gas muss derart abgeführt werden können, dass sich kein so hoher Druck aufbaut, der die technischen oder natürlichen Barrieren beschädigen würde.

Wegen der Zementverfüllung der Lagertunnel muss bei der Evaluation der Gasproduktion durch Korrosion ein sehr hoher pH berücksichtigt werden. Mit der Zementverfüllung ist auch bereits vor dem Lagerverschluss genügend Wasser vorhanden, um die Korrosion unmittelbar nach der Verfüllung der Lagertunnel in Gang zu setzen. Die Korrosionsrate von Stahl unter anaeroben Bedingungen und alkalischem Zementwasser wird auf 10 bis 100 nm a^{-1} geschätzt, für Al und Zn werden Raten von 1 mm a^{-1} angenommen (NTB 04-06, S. 22). Während von den entstehenden Gasen CO_2 als Kalzit ($CaCO_3$) wieder gebunden wird (NTB 02-05, S. 150), baut sich aufgrund der produzierten H_2 und CH_4 ein Gasdruck in den Lagertunneln auf.

Die Nagra geht von einer unmittelbar nach dem Verschluss einsetzenden Aufsättigung der Lagertunnel aus und lässt die Gasproduktion unter Vernachlässigung der schützenden Eigenschaften der Abfallverpackungen unmittelbar beginnen. Für den gesamthaft betrachteten Zeitraum geht die Nagra weiter davon aus, dass die Gasproduktion alleine durch die Geschwindigkeit der gasproduzierenden Reaktionen bestimmt wird. Die starke Korrosion und Gasproduktion in den ersten Jahren nach Verschluss ($700 m^3 a^{-1}$, unter Standardbedingungen STP) sind das Resultat der in den LMA-Gebinden vorhandenen Teile von Al, Zn und Organika, die ebenfalls sofort für die Korrosion bzw. den Abbau zugänglich sind. Der chemische Abbau der Organika durch Mikroorganismen läuft gemäss den Nagra-Berechnungen ebenfalls mit rascher Geschwindigkeit ab, obwohl das stark alkalische Milieu des Zementwassers eher ungünstige Bedingungen für die Verbreitung und Vermehrung von Mikroorganismen darstellt (NTB 93-33).

Nach anfänglich hoher Gasproduktion und vollständiger Korrosion der Al- und Zn-Teile im Abfall nimmt die Produktionsrate nach 10 Jahren auf ca. $100 m^3 a^{-1}$ (STP) ab und reduziert sich nach 10^4 Jahren weiter auf etwa $10 m^3 a^{-1}$ (STP) (NTB 02-05, S. 150). In den ersten 10 Jahren ist das produzierte Gas von H_2 dominiert, zwischen 10 und 1000 Jahren entsteht überwiegend CH_4 , danach wieder hauptsächlich H_2 . Unter diesen Umständen ist die Löslichkeit von H_2 und CH_4 im Porenwasser der Zementverfüllung rasch erreicht und der Gasdruck beginnt zu steigen. Das Gesamtvolumen des produzierten Gases wird mit $5 \cdot 10^5 m^3$ (STP) angegeben, davon soll der überwiegende Teil bereits nach 10^4 Jahren vorliegen. Die Gasproduktion endet nach 10^5 Jahren (NTB 04-06, S. 26).

Das produzierte Gas sammelt sich in der Tunnelverfüllung, die aus porösem Zementmörtel besteht (NTB 02-05, S. 107). Für die Zementverfüllung der LMA-Lagertunnel nimmt die Nagra eine Porosität von 30 % (NTB 02-06, S. 99) und eine hydraulische Leitfähigkeit von 10^{-13} bis $10^{-10} ms^{-1}$ (NTB 04-06) an. Damit kann die Zementverfüllung aufgrund ihrer Porosität als intermediärer Gasspeicher dienen. Zur Untersuchung der Speicherfunktion hat die Nagra die Herstellung hochporöser Zemente (mit Porositäten bis über 30 %) untersucht

(NTB 92-11) und die Herstellung in Grossversuchen getestet (NTB 98-03). Die Speicherkapazität der Zementverfüllung wird bei den oben angegebenen Gasmengen um rund einen Faktor 2 überschritten, wenn das Gas unter dem am Lagerort vorherrschenden hydrostatischen Druck von 6.5 MPa steht.

Hinsichtlich des Gastransportes betrachtet die Nagra folgende Vorgänge (NTB 02-05, S. 157):

- Diffusion des Gases in das umliegende Wirtgestein.
- Verdrängung des Wassers aus den Poren der Zementverfüllung in das umliegende Wirtgestein (unter Annahme einer anfänglich 50 %-igen Sättigung mit Wasser).
- Prozesse wie Zweiphasenfluss, Dilatanz (Mikrorissbildung) und Makrorissbildung, die das Gas oberhalb eines Prozess-spezifischen Schwellendruckes in das Wirtgestein drücken.

Die Nagra kommt zum Schluss, dass die entstehenden Gasmengen in der Zementfüllung der Lagertunnel gespeichert und in das angrenzende Wirtgestein in genügenden Mengen abgeführt werden kann, ohne dass es zu irreversiblen Verletzungen der Zementverfüllung oder des Wirtgesteins kommt.

Beurteilung der HSK

Aus der Sicht der HSK sind die folgenden Prozesse von der Nagra in konservativer Weise betrachtet worden:

- Berechnungen der Gasproduktionsraten: Die Nagra hat bei den meisten gasbildenden Prozessen Raten eingesetzt, die gegenüber den in der Literatur publizierten Werten als konservativ einzustufen sind.
- Stetige Wasserzufuhr während der Korrosion: Durch die Ausfällung von Kalzit aus dem Abbau des organischen Materials könnte die Wasserzufuhr eingeschränkt werden. Die Nagra lässt unberücksichtigt, dass die Korrosion dadurch verlangsamt würde.
- Bereits ab Lagerverschluss vollständige Zugänglichkeit aller Abfälle für Wasser: Die Nagra hat hier die um die Abfälle herum vorhandenen Verpackungen vernachlässigt, die den Zugang zu den Abfällen erst zulassen, nachdem sie durchkorrodiert sind.
- Nicht-Berücksichtigen des pH-Einflusses auf die mikrobielle Aktivität (vgl. NTB 93-33).
- Vernachlässigung der Verlangsamung der Korrosion bei Wasserverdrängung: Die Nagra hat unberücksichtigt gelassen, dass sich um die Abfälle herum Gasblasen ausbilden, die die Korrosion reduzieren können.

In Emch+Berger (2005) wird darauf hingewiesen, dass die Nagra bei ihren Berechnungen die Wasserzehrung unberücksichtigt gelassen hat, d.h. die Tatsache, dass bei der Korrosion der Metalle Wasser aufgebraucht wird und dies in der Volumen- und Wasserbilanz zu berücksichtigen ist. Aufgrund der fehlenden Wasserzehrung ist die Berechnung der Nagra ebenfalls als konservativ zu betrachten.

Der Kalzit, der aus CO₂ stammt, welches durch den Abbau von organischem Material produziert wird und unter alkalischen Bedingungen wieder ausfällt, wird von der Nagra nicht weiter behandelt. Die Kalzit-Ausfällungen können Poren der Zementverfüllung verstopfen und dadurch sowohl die Wasserzufuhr für die laufenden Abbau- und Korrosionsprozesse beein-

trächtigen als auch das für die Speicherung des produzierten Gases erforderliche Porenvolumen verringern. Die HSK hat die maximale Menge des produzierten Kalzits abgeschätzt. Unter Annahme einer vollständigen Umwandlung des produzierten CO₂ wird ein Volumen in der Grössenordnung von 200 m³ Kalzit ausgefällt. Dies entspricht ca. 5 % des insgesamt in den LMA-Tunneln vorhandenen Porenvolumens. Die Ausfällung des Kalzits hat daher kaum Folgen für das Gasaufnahmevermögen der Zementverfüllung der Tunnel. Sie könnte hingegen um die Gebinde mit grösseren Organikamengen zu einer lokalen Verstopfung der Wasserfliesswege führen.

Bezüglich der Gastransportmechanismen sind einige Annahmen der Nagra schwach begründet. Das betrifft z.B. die Annahme einer anfänglichen 50 %igen Sättigung. Die Nagra nimmt eine sehr effektive Wasserverdrängung im Zement an, obwohl Experimente mit hochporösen Mörteln darauf hingewiesen haben, dass grössere Mengen an Wasser im Mörtel verbleiben (NTB 98-03). Zur Zugänglichkeit des in der Zementverfüllung vorhandenen Porenvolumens sind keine näheren Angaben gemacht worden. Es stellt sich die Frage, ob die totale Porosität von 30 % tatsächlich für das Gas zugänglich ist. Das Vorkommen von isolierten oder für einen Wasser-Gas-Austausch schlecht zugänglichen Hohlräumen kann eine Reduktion der effektiven Porosität bedeuten.

Die Wärmeproduktion aufgrund des radioaktiven Zerfalls und der Zementhydratation bleibt bei der Betrachtung von Gasproduktion und -transport der Nagra unberücksichtigt. Numerische Modellierungen (NTB 01-04, Appendix D) legen nahe, dass die maximale Temperatur im Referenzfall 50°C nicht überschreitet. Daraus schliesst die Nagra, dass der Temperatureffekt marginal sei. Eine eingehendere Begründung, dass der Effekt auf die Gasproduktion und den Gastransport unbedeutend ist, wird nicht gegeben. Die Gasproduktion durch mikrobiologische Prozesse könnte beeinflusst werden, da die Temperatur für die Tätigkeit von Mikroorganismen ein wichtiger Faktor darstellt. Im Falle einer Weiterführung des Projekts sollte die Nagra den Temperatureinfluss auf die Gasproduktion durch Abbau der Organika berücksichtigen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die HSK mit der von der Nagra dargelegten Entwicklung von Gasproduktion, -druck und -transport einverstanden ist. Die durch die Nagra eingebauten Konservativitäten zu Gasproduktion und Gastransport, sowie die Vernachlässigung der Wasserzehrung lassen vermuten, dass ein Gasdruckaufbau in den LMA-Lagertunneln zwar stattfinden wird; das entstehende Gas kann aber ohne irreversible Verletzung der Barrieren abgeführt werden, insbesondere wenn die Wasserzehrung bei der Gasproduktion berücksichtigt wird.

4.7 Die natürliche Barriere Wirtgestein

Das Wirtgestein hat primär folgende Aufgaben zu erfüllen. Es soll

- die technischen Barrieren im Nahfeld vor äusseren Einwirkungen schützen,
- den Wasserfluss zum Nahfeld beschränken,
- den Transport der aus dem Nahfeld austretenden Radionuklide verzögern.

Die ersten beiden Punkte wurden in der Diskussion des Standortnachweises dargelegt und beurteilt (siehe Abschnitte 2.5 und 2.4.4). In den folgenden Abschnitten werden die Mecha-

nismen des Nuklidtransports und die geochemischen Bedingungen im Wirtgestein beurteilt, die verlangsamte Ausbreitung der Radionuklide bewirken. Dank der genügenden Überdeckung der Opalinustonschicht durch die Rahmengesteine und weitere Schichten (siehe Abschnitt 2.5) kann davon ausgegangen werden, dass die transportrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins während der gesamten zu betrachtenden Zeitdauer konstant bleiben.

4.7.1 Mechanismen der Radionuklidausbreitung

Angaben der Nagra

Es gibt klare Hinweise darauf, dass im Wirtgestein der Transport von im Porenwasser gelösten Teilchen diffusionsdominiert ist. Ein wichtiger Hinweis auf die untergeordnete Rolle der Advektion sind die natürlichen Tracerprofile, welche zeigen, dass Diffusion über geologische Zeiträume hinweg der dominierende Transportprozess gewesen ist (NTB 02-03, Kap. 4.7 und der dort zitierte detailliertere Referenzbericht Gimmi und Waber (2003)).

Die Grösse der Diffusionskoeffizienten in Tongesteinen ist von der Porosität des Gesteins abhängig. Ein Vergleich der experimentell bestimmten effektiven Diffusionskoeffizienten D_e von Tritium in unterschiedlichen Tonformationen zeigt, dass der Diffusionskoeffizient mit kleiner werdender Porosität stärker als linear abnimmt (NTB 02-05, Seite 81). Die Schichtstruktur des Opalinustons beeinflusst ebenfalls den Nuklidtransport. So ist die experimentell bestimmte Diffusionsrate parallel zur Gesteinsschichtung rund 5-mal grösser als senkrecht zu ihr.

Der grösste Teil des wassergefüllten Porenraums des Opalinustons besteht aus Poren mit Öffnungen im Bereich 1-100 nm. Die sehr filigrane Struktur des Porenraums ist der Grund für die äusserst geringe hydraulische Durchlässigkeit, trotz des beträchtlichen Wassergehalts des Wirtgesteins. Sie verursacht auch eine starke Kopplung zwischen Gesteinsstruktur und Stofftransporteigenschaften des Opalinustons, indem ein nicht vernachlässigbarer Teil des Porenraums durch die elektrische Ladungsverteilung im Festkörper beeinflusst wird. Eine detaillierte Modellierung der komplexen Transportvorgänge ist deshalb schwierig. Für die Modellierung der Diffusion in der Sicherheitsanalyse behandelt die Nagra den Opalinuston als homogen poröses Material. Das aufgrund ihrer elektrischen Ladung unterschiedliche Ausbreitungsverhalten der Nuklide modelliert sie durch die Verwendung von ladungsabhängigen Parameterwerten.

Die Advektion wird bis zum Abbau des Überdrucks im Opalinuston durch die Druckunterschiede zwischen dem Opalinuston und den oberen und unteren Rahmengesteinen verursacht. Die Durchlässigkeit des Opalinustons ist aufgrund der Gesteinsstruktur anisotrop. Die Nagra verwendet einen 5mal kleineren Wert ($2 \cdot 10^{-14}$ m/s) für die vertikale als für die horizontale Durchlässigkeit ($1 \cdot 10^{-13}$ m/s). Gemäss Modellberechnungen der Nagra beträgt der spezifische Vertikalfloss auf Lagerebene im Wirtgestein rund $2 \cdot 10^{-14}$ m/s (NTB 02-03); am Übergang zum Wedelsandstein ergibt sich ein Wert von ungefähr $7 \cdot 10^{-14}$ m/s. Vorsichtshalber rechnet die Nagra mit der uneingeschränkten Gültigkeit des Darcy-Gesetzes bei den Durchlässigkeitswerten und Druckunterschieden, die im Wirtgestein vorkommen. Dadurch wird die Freisetzung der Radionuklide möglicherweise überschätzt. Unter dieser Annahme tragen die advektiven Vorgänge auch bei den Verhältnissen, die im Opalinuston herrschen, zur Freisetzung bei.

Der Nuklidtransport durch den Opalinuston wird durch die Sorption von Nukliden auf Porenwänden, bzw. Mineraloberflächen verzögert. Durch Sorption von Radionukliden auf Kolloiden könnte der Nuklidtransport grundsätzlich auch beschleunigt werden. Aufgrund der kleinen Poren im Wirtgestein sind Kolloide allerdings nicht mobil (NTB 02-06, S. 25). Ihr Einfluss auf die Nuklidausbreitung wird deshalb vernachlässigt.

Beurteilung der HSK

Im Opalinuston bestimmen die Tonminerale, wegen ihrer besonderen Kristallformen und -größen, die Geometrie des Porenraumes und führen zu für die Rückhaltung günstigen Werten der Transportparameter wie hydraulische Durchlässigkeit oder Diffusionskoeffizient. Die Tonminerale besitzen reaktive Oberflächen, die sowohl mit Kationen wie mit Anionen durch die Bildung von Oberflächenkomplexen reagieren und wesentlich zur Retardierung beitragen. Die negative Strukturladung der Tonmineraloberflächen führt zu Anlagerung von Kationen, die auch für Ionenaustausch zur Verfügung stehen. Demgegenüber werden Anionen von den Tonoberflächen abgestossen, was den makroskopisch beobachtbaren Anionenausschluss (Verringerung des effektiv zugänglichen Porenraums) hervorruft.

Die Nagra verwendet einen vereinfachten Ansatz, um die komplexen Vorgänge während des Nuklidtransportes zu beschreiben. Es werden für Kationen und Anionen zwei unterschiedliche Werte für die Porosität des Wirtgesteins (Anionenausschluss) und zwei Werte für den effektiven Diffusionskoeffizienten angenommen. Die HSK stuft diese Modellierung als zweckmässig ein. Die so gewonnenen Ergebnisse sind aussagekräftig, falls die möglicherweise problematische Übertragung von experimentell bestimmten Parametern auf die Bedingungen im Tiefenlager gewährleistet ist (siehe auch 4.7.4).

Die HSK stimmt mit der Nagra darin überein, dass die Diffusion der für die Nuklidmigration im Opalinuston massgebliche Prozess ist. Das ist auch im Einklang mit Resultaten der Isotopen-Messungen an Porenwasserproben des Wirtgesteins und der Rahmengesteine (siehe Abschnitt 2.4.3). Die HSK weist jedoch darauf hin, dass der Anteil des advektiven Nuklidtransports an der Migration des dosisbestimmenden Nuklids ¹²⁹I gemäss Berechnungen der Nagra rund 25 % beträgt (siehe Abschnitt 4.11.1).

Die Begründung der Nagra für die Nichtberücksichtigung des Nuklidtransportes durch Sorption auf Kolloide in den Ausbreitungsrechnungen ist für die HSK nachvollziehbar.

4.7.2 Geochemische Bedingungen

Die chemische Zusammensetzung des Grundwassers im Opalinuston ist einerseits für die Mobilität der aus dem Tiefenlager freigesetzten Radionuklide im Wirtgestein von Bedeutung, andererseits beeinflusst sie die chemischen Bedingungen im Nahfeld, da die eingebrachten Verfüllungen der Lagerstollen durch Wasser aus dem Wirtgestein aufgesättigt werden. Wegen der chemischen Ähnlichkeit des Bentonits mit dem Opalinuston sind keine bedeutsamen Wechselwirkungen zwischen dem Nahfeld BE/HAA und dem Wirtgestein zu erwarten. Im Falle des mit Zement verfüllten LMA-Nahfelds ist die Situation anders: Wegen der stark unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen der Porenwässer im Zement und im Opalinuston werden an der Grenze zwischen Nah- und Fernfeld des LMA-Lagers starke Wechselwirkungen auftreten, die zu Mineralumwandlungen führen werden (siehe Abschnitt 4.8.4).

Angaben der Nagra

Das Vorgehen der Nagra bei der Herleitung der Zusammensetzung des Grundwassers im Wirtgestein ist in Pearson (2002) beschrieben. Die Wasserzusammensetzung wird durch die mineralogische Zusammensetzung des Opalinustons bestimmt. Gesteinsproben der Bohrungen Benken, Weiach, Riniken und Schafisheim wie auch des Faltenjuras (Felslabor Mont Terri) zeigen, dass die mineralogische Zusammensetzung des Opalinustons an diesen Orten qualitativ weitgehend dieselbe ist, wobei die relativen Verhältnisse der einzelnen Mineralien leicht variieren. Der Opalinuston der Bohrung Benken (NTB 02-05) besteht aus 54 Gewichts-% Schichtsilikaten (Illit, Kaolinit, Illit/Smektit-Wechselagerungen und Chlorit), 20 % Quarz und 16 % Kalzit, sowie etwas Siderit, Kalifeldspat, Pyrit, Albit und Dolomit. Der Opalinuston aus dem Felslabor Mont Terri besteht aus 63 % Schichtsilikaten, 18 % Quarz und 10 % Kalzit, sowie etwas Siderit, Pyrit, Albit, Kalifeldspat und Dolomit (NTB 02-19).

Da es nicht möglich war, aus der Bohrung in Benken Wasserproben für die direkte Bestimmung der Grundwasserzusammensetzung zu entnehmen, musste die Nagra die chemische Zusammensetzung des Referenzwassers aus indirekten Beobachtungen und Modellierungen herleiten. Zu diesem Zweck wurden in erster Linie die Resultate von Auslaugversuchen mit Opalinuston aus dem Bohrloch Benken verwendet. Diese wurden unter der Annahme von Gleichgewichten zwischen dem Wasser und den mineralogischen Bestandteilen des Opalinustons in ein thermodynamisches Modell integriert. Auf diese Weise konnte ein Modellwasser für den Opalinuston hergeleitet und durch Analogien mit analytischen Resultaten aus dem Felslabor Mont Terri ergänzt werden.

Der Partialdruck von CO_2 , $p(\text{CO}_2)$, kann nicht direkt in der Bohrung gemessen werden. Der Wert ist von Bedeutung, weil er einen grossen Einfluss auf den pH-Wert des Grundwassers hat. Zudem bestimmt er die Karbonatkonzentration, die für die Speziation der Actiniden und weiterer Nuklide von Bedeutung ist. Aufgrund von Vergleichen und Modellrechnungen wurde der im Opalinuston des Felslabors Mont Terri bestimmte Wert von $p(\text{CO}_2) = 10^{-2.2}$ bar übernommen. Als obere bzw. untere Limite wurden der höchste im Mont Terri bestimmte Wert ($10^{-1.5}$ bar) und der Wert unter atmosphärischen Bedingungen ($10^{-3.5}$ bar) verwendet. Die Schlüsselparameter pH und Eh werden durch diese Variation direkt beeinflusst. Die Zusammensetzung des Referenzwassers für den Opalinuston sowie ihr Variationsbereich „tiefer $p(\text{CO}_2)$ “ und „hoher $p(\text{CO}_2)$ “ sind in Tabelle 4.7-1 aufgeführt. Der pH-Wert wurde formal aus der Ladungsbilanz der Wasserinhaltsstoffe abgeleitet.

Die Herleitung des Redoxpotentials wurde von Pearson (2002) ausführlich diskutiert. Verschiedene redox-aktive Substanzen im Opalinuston wurden dabei in Betracht gezogen. Aus diesen Betrachtungen kam der Autor zum Schluss, dass das Redoxpotential durch das Gleichgewicht zwischen Pyrit und Sulfat bestimmt sein müsse. Die Variation in $p(\text{CO}_2)$ führte zu einer Spannbreite von insgesamt etwa 100 mV.

Tabelle 4.7-1: Chemische Zusammensetzung des Grundwassers im Opalinuston (aus Pearson, 2002). Die aus den Unsicherheiten in $p(\text{CO}_2)$ stammende Bandbreite der Erwartungswerte ist in den Kolonnen Opalinuston „tiefer $p(\text{CO}_2)$ “ respektive Opalinuston „hoher $p(\text{CO}_2)$ “ ersichtlich. Die Konzentrationen sind in $[\text{mol dm}^{-3}]$ angegeben.

	Referenzwasser Opalinuston	Opalinuston „tiefer $p(\text{CO}_2)$ “	Opalinuston „hoher $p(\text{CO}_2)$ “
pH	7.24	8.18	6.80
Eh [mV]	−167	−238	−136
$\log p(\text{CO}_2)/\text{bar}$	−2.2	−3.5	−1.5
Ionenstärke $[\text{eq dm}^{-3}]$	0.228	0.094	0.307
CO_3	$2.70 \cdot 10^{-3}$	$9.80 \cdot 10^{-4}$	$5.85 \cdot 10^{-3}$
Na	$1.69 \cdot 10^{-1}$	$8.02 \cdot 10^{-2}$	$2.14 \cdot 10^{-1}$
Ca	$1.05 \cdot 10^{-2}$	$1.86 \cdot 10^{-3}$	$1.83 \cdot 10^{-2}$
Mg	$7.48 \cdot 10^{-3}$	$1.34 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-3}$
K	$5.65 \cdot 10^{-3}$	$2.61 \cdot 10^{-3}$	$7.27 \cdot 10^{-3}$
Sr	$3.04 \cdot 10^{-4}$	$5.44 \cdot 10^{-5}$	$5.31 \cdot 10^{-4}$
SO_4 (Sulfat)	$2.40 \cdot 10^{-2}$	$4.00 \cdot 10^{-3}$	$4.00 \cdot 10^{-2}$
Sulfid	$1.41 \cdot 10^{-11}$	$3.38 \cdot 10^{-11}$	$1.40 \cdot 10^{-11}$
F	$1.67 \cdot 10^{-4}$	$2.67 \cdot 10^{-4}$	$1.49 \cdot 10^{-4}$
Cl	$1.60 \cdot 10^{-1}$	$8.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-1}$
Br	$2.40 \cdot 10^{-4}$	$1.20 \cdot 10^{-4}$	$3.00 \cdot 10^{-4}$
Fe	$4.33 \cdot 10^{-5}$	$8.00 \cdot 10^{-6}$	$7.74 \cdot 10^{-5}$
Mn	$2.42 \cdot 10^{-5}$	$4.81 \cdot 10^{-6}$	$4.28 \cdot 10^{-5}$
Si	$1.78 \cdot 10^{-4}$	$1.84 \cdot 10^{-4}$	$1.77 \cdot 10^{-4}$

Beurteilung der HSK

Verschiedene indirekte Beobachtungen dienten der Nagra für die Herleitung der chemischen Zusammensetzung des Referenzwassers im Opalinuston. Diese Beobachtungen stammen aus Experimenten mit Opalinustonproben aus dem Bohrloch Benken, aus Messungen im Felslabor Mont Terri und aus Modellrechnungen über bekannte Wechselwirkungen zwischen den Bestandteilen des Opalinustons und dem Wasser. Das Vorgehen der Nagra ist gut dokumentiert und nachvollziehbar. Die gewählte Variationsspanne für den $p(\text{CO}_2)$ -Wert reicht über zwei Größenordnungen und scheint den Erwartungsbereich genügend breit abzudecken.

Die totale Wasserstoffionenkonzentration, die für die Modellierung des pH-Wertes benötigt wird, ist in einem natürlichen Wasser analytisch nicht messbar. Sie entspricht der stöchio-

metrischen Summe der Konzentrationen der protonierten Spezies und ist abhängig vom gewählten Speziationsmodell. Das Vorgehen der Nagra, die totale Wasserstoffionenkonzentration aus der Ladungsbilanz der Wasserinhaltsstoffe zu bestimmen (wie in Pearson (2002) beschrieben), wird zwar oft praktiziert, ist aber heikel, weil sich dadurch Ungenauigkeiten bei der Bestimmung und Herleitung weniger kritischer Wasserinhaltsstoffe direkt auf den pH-Wert übertragen können. So können bereits geringe Abweichungen in den im Modell festgelegten Konzentrationen von Chlorid und Sulfat zu bedeutsamen Fehlern im pH-Wert führen. Der Grund für Diskrepanzen zwischen modellierten und gemessenen pH-Werten, wie sie in NTB 97-07 diskutiert wurden, ist also nicht nur im möglichen „Ausgasen“ von CO_2 während der Probenahme, sondern ebenso in der Abwälzung von Ungenauigkeiten im Grundwassermodell auf den pH-Wert zu suchen.

Der von der Nagra hergeleitete pH-Bereich von 6.8 bis 8.2 für das Opalinuston-Grundwasser ist kompatibel mit dem pH-Wert von 7.7 einer Wasserprobe aus der Bohrung BWS A1 im Felslabor Mont Terri, sowie mit dem pH-Wert von 7.5 aus einem Auspressversuch mit Opalinuston vom Mont Terri. Auslaugversuche über 7 und 28 Tage bei verschiedenen fest/flüssig-Verhältnissen mit Opalinuston vom Mont Terri ergaben jedoch pH-Werte zwischen 8.3 und 9.1 (NTB 97-07). Eine Erklärung für diese Diskrepanz steht noch aus; die Nagra wies einzig auf die relativ grosse Unsicherheit im pH-Wert des Grundwassers hin. Im Falle einer Weiterführung des Projekts empfiehlt die HSK daher, den pH-Wert des Opalinuston-Grundwassers neu zu überprüfen.

Der Eh-Wert, für den die Nagra eine Variationsspanne von -238 mV bis -136 mV verwendete, basiert auf der Annahme eines Gleichgewichts zwischen Pyrit und Sulfat. Es ist bekannt, dass Redoxreaktionen zwischen Sulfat und reduzierten Schwefelspezies wie Sulfid, Disulfid oder elementarem Schwefel, die im Labor unter Umweltbedingungen nicht in Gang kommen, in der Natur stattfinden können, und dass sie durch spezielle Bakterien katalysiert werden. Aufgrund der langen Verweildauer des Porenwassers erachtete die Nagra die Annahme eines Gleichgewichts zwischen Pyrit und Sulfat als vernünftig. Die HSK stellt diese Annahme in Frage. Ob solche Reaktionen in der Natur über sehr lange Zeiträume die Redoxeigenschaften eines Gesteins bestimmen können, scheint der HSK zum heutigen Zeitpunkt zu wenig gesichert. Das für den Referenzfall verwendete Redoxpotential von -167 mV für den Opalinuston kann daher nicht als gesichert angesehen werden. Nach Ansicht der HSK deckt die von der Nagra gewählte Variationsbreite von rund 100 mV jedoch einen akzeptablen Bereich ab, der bei der Herleitung der Sorptionsdaten redoxsensitiver Elemente im Opalinuston berücksichtigt wurde.

4.7.3 Sorptionskoeffizienten der Radionuklide

Die Migration von Radionukliden, die aus dem Nahfeld des BE/HAA- oder des LMA-Lagers ins umgebende Wirtgestein gelangen, wird durch Wechselwirkungen mit den Gesteinsoberflächen des Opalinustons verzögert. Wie im Bentonit können Radionuklide im Opalinuston sowohl durch Ionenaustausch als auch durch Oberflächenkomplexierung sorbieren. Neuere Sorptionsmessungen auf Opalinuston und auf Illit, einem Hauptmineral des Opalinustons, schaffen eine Grundlage für die Herleitung verlässlicher Daten und zeigen, dass die Sorptionsmechanismen des Opalinustons mit denen des Bentonits vergleichbar sind. Dies ermöglicht eine gewisse Übertragbarkeit der Daten unter Anwendung entsprechender Korrekturfaktoren.

Angaben der Nagra

Der von der Nagra verwendete Sorptionsdatensatz enthält einen Referenzwert mit unterem und oberem Grenzwert für den Variationsbereich. Die Herleitung der K_d -Werte erfolgte am PSI in systematischer Weise und ist in NTB 02-19 ausführlich beschrieben. Sofern vorhanden, wurden eigene Messungen an Opalinuston berücksichtigt. Eigene Messungen an konditioniertem Illit und Daten aus der Literatur wurden mit verschiedenen Korrekturfaktoren auf die Eigenschaften von Opalinuston aus der Bohrung Benken skaliert (siehe Abschnitt 4.5.3.8).

Die von der Nagra verwendeten Sorptionskoeffizienten sind in Tabelle 4.7-2 aufgeführt. Sie stammen in den Fällen von Cs(I), Sr(II), Ni(II), Eu(III), Th(IV), Sn(IV) und I(-I) aus eigenen Messungen, die am PSI an Opalinustonproben aus dem Mont Terri durchgeführt wurden. Die für die Messung der Sorptionsisothermen eingestellten pH-Werte (6.3 und 7.8) entsprachen nicht exakt dem pH-Wert des erst zu einem späteren Zeitpunkt definierten Referenzwassers des Opalinustons (Tabelle 4.7-1). Die Kenntnis der auf Illit gemessenen pH-Abhängigkeit der K_d -Werte ermöglichte die für Ni(II), Eu(III) und Sn(IV) notwendigen Korrekturen. Die Sorption von Cs(I), Sr(II), Th(IV) und I(-I) zeigte im pH-Bereich des Opalinuston-Grundwassers keine pH-Abhängigkeit. Bei Eu(III), Th(IV) und Sn(IV) wurden sehr hohe K_d -Werte im Bereich von $100 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ gemessen. Sorptionsmessungen an Illit aus der Literatur ergaben auch für Am(III) hohe K_d -Werte. Die Nagra verwendete diese gut dokumentierten Werte auch für weitere Elemente, deren Sorptionsverhalten bisher überhaupt nicht oder nicht mit dieser Gründlichkeit untersucht worden ist.

Die von der Nagra verwendeten Analogien basieren hauptsächlich auf der vorliegenden Wertigkeit der Elemente und können wie folgt zusammengefasst werden:

- Th(IV): Tc(IV), U(IV), Np(IV)
- Sn(IV): Zr(IV)
- Am(III): Ac(III), Pu(III), Cm(III)
- Eu(III): Sm(III), Ho(III)
- Ni(II): Be(II)
- Ca (II): Sr(II), Ra(II)
- Se(IV): Po(IV)

Tabelle 4.7-2: Sorptionskoeffizienten in $[m^3 kg^{-1}]$ im Opalinuston. Die chemische Zusammensetzung des Grundwassers ist in Tabelle 4.7-1 aufgeführt. Als *Lower Limit* wird der pessimistische untere Grenzwert des Sorptionskoeffizienten bezeichnet. HSK-Werte, die von den Nagra-Werten abweichen, sind **fett gedruckt**.

Element	Referenzwert Nagra	Referenzwert HSK	<i>Lower Limit</i> Nagra	<i>Lower Limit</i> HSK
H	0	0	0	0
Be	0.9	0.9	0.03	0.03
C _{inorg}	0.001	0.001	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
C _{org}	0	0	0	0
Cl	0	0	0	0
Ca	0.001	0.001	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Co	0.4	0.4	0.01	0.01
Ni	0.9	0.9	0.03	0.03
Se	0	0	0	0
Sr	0.001	0.001	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Zr	10	1	0.3	0.1
Nb	4	1	0.1	0.1
Mo	0.01	0.01	0.001	0
Tc	50	0.04	0.5	0.004
Pd	5	5	0.2	0.2
Ag	0	0	0	0
Sn	100	100	0.2	0.1
I	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$	0
Cs	0.5	0.5	0.09	0.01
Sm	50	10	5	1
Eu	50	10	5	1
Ho	50	10	5	1
Pb	2	2	0.02	0.02
Po	0.1	0.1	0.04	0
Ra	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Ac	10	10	1	1
Th	50	50	10	10
Pa	5	5	0.2	0.05
U	20	20	0.5	0.1
Np	50	50	5	0.5
Pu	20	10	1	1
Am	10	10	1	1
Cm	10	10	1	1

Dabei kamen in den nachstehend erwähnten Fällen die in Abschnitt 4.5.3.8 beschriebenen Korrekturfaktoren zur Anwendung. Die Nagra korrigierte den K_d -Wert von Uran aufgrund der Anwesenheit der oxidierten Form U(VI) proportional nach unten, indem sie konservativerweise annahm, U(VI) sorbiere unter den gegebenen Bedingungen nicht. Im Falle von Zirkonium kam wegen der Dominanz anionischer Hydroxokomplexe ein Speziationfaktor zur Anwendung, der den K_d -Wert gegenüber jenem von Zinn um das Zehnfache reduzierte. Die Analogie zwischen Ca(II), Sr(II) und Ra(II) bestand in der Verwendung identischer Ionenaustauschkonstanten für die Berechnung der K_d -Werte. Die Messungen von Se(IV) an Opalinuston am PSI waren für den Entsorgungsnachweis nicht relevant, weil Selen im Opalinuston gemäss den Modellrechnungen als Se(-II) vorliegt. Die Messungen von Se(IV) konnten aber als Datengrundlage für Po(IV) verwendet werden. Für den Entsorgungsnachweis setzte die Nagra für Se $K_d = 0$. Den K_d -Werten von Co(II), Nb(V), Mo(VI), Pb(II) und Pa(V) liegen Daten aus der Literatur über Einzelmessungen an tonhaltigen Gesteinen zugrunde. Der Wert für Pd(II) ist ein Schätzwert, der mit dem für Bentonit gewählten Wert übereinstimmt. Er wurde damit gerechtfertigt, dass Pd(II) wegen der starken Neigung zur Hydrolyse stärker sorbiere als weniger stark hydrolysierende zweiwertige Kationen wie Pb(II) und Ni(II). Die Nagra ging bei der Berechnung des K_d -Wertes von C_{inorg} (Karbonat) von einem Isotopenaustausch mit dem im Opalinuston vorhandenen Kalzit aus. Dabei wurde die in NTB 96-05 begründete Annahme übernommen, dass nur 0.27% der Kalzitmasse für den Isotopenaustausch zur Verfügung stehen (siehe auch Abschnitt 4.5.3.8). Für H, C_{org} , Cl und Ag setzte die Nagra $K_d = 0$.

Beurteilung der HSK

Die HSK hat für jedes Element den Referenzwert und den unteren Grenzwert überprüft (HSK 35/85). Die oberen Grenzwerte wurden von der Nagra für die probabilistischen Analysen benötigt und sind von der HSK nicht überprüft worden, da sie weniger sicherheitsrelevant sind. In Tabelle 4.7-2 sind die von der HSK verwendeten K_d -Werte aufgelistet und den Werten der Nagra gegenübergestellt.

Die Herleitung und Selektion der Sorptionskoeffizienten durch die Nagra ist in allen Fällen nachvollziehbar und in den meisten Fällen plausibel. Die Verwendung von Korrekturfaktoren für die Mineralogie, den pH-Wert und die Speziation erlaubt eine quantitative Berücksichtigung von Änderungen in den chemischen Einflussgrössen. Die für diese Korrekturen notwendige Kenntnis der Sorptionsmechanismen ist dank systematischen Messungen am PSI für die meisten Kategorien von Elementen weitgehend vorhanden. Die Nagra war wegen des Fehlens direkter experimenteller Daten bei mehreren Elementen gezwungen, auf Analogien abzustützen. In den meisten Fällen sind die verwendeten Analogien durch Erfahrungen im chemischen Verhalten begründet. Solange jedoch experimentelle Bestätigungen dieser Analogien ausstehen, sind die unteren Grenzwerte sehr restriktiv anzusetzen.

Nicht einverstanden ist die HSK mit den Analogien zwischen Sn(IV) und Zr(IV) respektive zwischen Th(IV) und Tc(IV), da diese weder theoretisch noch experimentell begründet sind. Für Zr sind in der Literatur Diffusionsexperimente im natürlichen Bentonit Kunigel V1 vorhanden, aus denen sich K_d -Werte zwischen 11 und 17 m³kg⁻¹ abschätzen lassen (NTB 02-17), was mit dem Wert der Nagra kompatibel wäre. Opalinuston hat jedoch eine rund sechsmal kleinere Kationenaustauschkapazität als Kunigel V1, und es muss angenommen werden, dass die für die Oberflächenkomplexierung relevanten reaktiven Stellen im Opalinuston um

einen ähnlichen Faktor verringert sind. Die HSK reduziert daher den K_d -Wert der Nagra für Zr um das Zehnfache. Im Fall von Tc gilt derselbe Kommentar wie bei der Sorption im Bentonit (Abschnitt 4.5.3.8). Die HSK zieht es vor, auf Diffusionsmessungen im Bentonit Kunigel V1 abzustützen und skaliert den für Bentonit vorgeschlagenen K_d -Wert entsprechend den Kationenaustauschkapazitäten von Bentonit und Opalinuston, woraus $K_d = 0.04 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ resultiert.

Im Falle von Niob verwendete die Nagra wie bei Bentonit K_d -Werte an Sedimenten und korrigierte sie auf den stärker sorbierenden Opalinuston. Aus denselben Gründen wie in Abschnitt 4.5.3.8 beschrieben reduziert die HSK den K_d -Wert von Nb auf $K_d = 1 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$.

Für Europium verwendete die Nagra den bei pH = 7.8 auf Opalinuston gemessenen K_d -Wert und korrigierte ihn aufgrund der an konditioniertem Illit gemessenen pH-Abhängigkeit der Eu(III)-Sorption auf den pH-Wert von 7.24 des Referenzwassers. Die Korrektur war gering, und es resultierte ein K_d -Wert von rund $50 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$. Der Korrekturfaktor für den pH-Wert stammt aber aus Messungen in Abwesenheit von Karbonat. Es ist bekannt, dass Eu(III) eine starke Neigung zur Bildung von Karbonatkomplexen hat, und dass ihre Existenz die pH-Abhängigkeit der Eu(III)-Sorption beeinflusst. Die HSK hat diesen Einfluss abgeschätzt und kommt zur Erkenntnis, dass die pH-Korrektur grösser sein muss als von der Nagra angenommen und zu einem K_d -Wert von rund $10 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ führt. Diesen Wert verwendet die HSK auch für Sm und Ho, in Analogie zu Eu.

Für Plutonium, das im Opalinuston gemäss Speziationsrechnungen der Nagra vorwiegend als Pu(III) vorliegt, verwendete die Nagra Am(III) als Analogon. Der berechnete geringe Anteil an Pu(IV) wurde von der Nagra nicht als stärker sorbierend als Pu(III) betrachtet, weshalb der K_d -Wert mit demjenigen von Am(III) identisch sein sollte. Der wohl auf einem Rundungsfehler beruhende Wert von $20 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ wird von der HSK deshalb auf $10 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ zurückgesetzt.

Bei folgenden Elementen akzeptiert die HSK den Referenzwert, zieht aber wegen vorhandener Ungewissheiten einen tieferen unteren Grenzwert und damit eine grosszügigere Sicherheitsmarge vor: Mo, Sn, I, Cs, Po, Pa, U und Np. Insbesondere im Fall von Sn hat die HSK (ähnlich wie die Nagra) den unteren Grenzwert im Vergleich zum Referenzwert, der experimentell bestimmt wurde, sehr tief gesetzt. Der Grund liegt einerseits im Fehlen eines molekularen Sorptionsmodells, andererseits in der Abwesenheit von Karbonat bei den Experimenten. Karbonat liegt im Referenzwasser Opalinuston in bedeutender Konzentration vor und könnte die Sorption von Sn wesentlich beeinflussen. Die HSK erachtet aufgrund der Informationen über das Sorptionsverhalten vierwertiger Metallionen auf Tonmineralen einen K_d -Wert für Sn(IV) tiefer als $0.1 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ als unwahrscheinlich und verwendet diesen Wert als unteren Grenzwert. Auch für Zr, Tc und die Lanthaniden (Sm, Eu, Ho) setzt die HSK eine tiefere untere Limite als die Nagra.

Zu den Sorptionskoeffizienten der restlichen Elemente hat die HSK keine Einwände.

4.7.4 Diffusionskoeffizienten

Angaben der Nagra

Für die Modellierung der Radionuklid-Diffusion im Opalinuston unterschied die Nagra zwischen Diffusion senkrecht und Diffusion parallel zur Schichtung des Opalinustons. Die

Ergebnisse aus den bisherigen Messungen sind in NTB 02-03 (Kap. 5.10) zusammengefasst und diskutiert. Versuche mit Opalinustonproben aus dem Mont Terri und aus der Bohrung Benken zeigten eine rund fünfmal grössere Diffusivität parallel zur Schichtung als senkrecht zur Schichtung. Messungen an Proben aus der Bohrung Benken ergaben gegenüber Proben vom Mont Terri generell kleinere effektive Diffusionskoeffizienten. Erste Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der Diffusion von tritiiertem Wasser lassen bei 38°C (erwartete Temperatur des Wirtgesteins) eine Erhöhung der Diffusionskonstanten um den Faktor 2 gegenüber Raumtemperatur erwarten. Aus diesen Fakten leitete die Nagra einen effektiven Diffusionskoeffizienten von $10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ab, die für die meisten Radionuklide in senkrechter Richtung zur Schichtung gilt. In paralleler Richtung zur Schichtung verwendete die Nagra $D_e = 5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

Die für die Diffusion der Radionuklide massgebliche Porosität des Opalinustons wurde von der Nagra auf 0.12 geschätzt. Dieser Wert resultierte aus der Mittelung zahlreicher, mit verschiedenen Messmethoden durchgeführter Porositätsbestimmungen (NTB 02-03, Kap. 5.4).

Wie im Falle von Bentonit wählte die Nagra abweichende Diffusionskoeffizienten für die Radionuklide, die als stabile Anionen vorliegen (C_{inorg} , Cl, Se, Mo, I und Po). Diffusionsmessungen an Proben aus der Bohrung Benken zeigten eine rund zehnmal geringere Diffusivität für Anionen (Cl^- , I^-) als für tritiiertes Wasser. Die Nagra verwendete deshalb für die stabilen Anionen effektive Diffusionskoeffizienten von $10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (senkrecht zur Schichtung) und $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (parallel zur Schichtung). Auch die zugängliche Porosität im Opalinuston ist für Anionen geringer als für nicht-anionische Tracer, wie die verfügbaren Diffusionsmessungen zeigen (NTB 02-03, Kap. 5.10). Die Nagra leitete aus diesen Messungen für die Anionen eine Diffusionsporosität von 0.06 ab.

Für die effektiven Diffusionskoeffizienten senkrecht zur Schichtung legte die Nagra zudem pessimistische Werte (*upper limits*) fest: $10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ für die meisten Radionuklide und $3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ für die stabilen Anionen C_{inorg} , Cl, Se, Mo, I und Po.

Beurteilung der HSK

Das Vorgehen der Nagra bei der Festlegung der Diffusionskoeffizienten im Opalinuston ist nachvollziehbar und plausibel. Die experimentelle Grundlage besteht im Wesentlichen aus Diffusionsmessungen mit tritiiertem Wasser. Die Nagra ging davon aus, dass die aus diesen Messungen resultierenden effektiven Diffusionskoeffizienten näherungsweise für alle Radionuklide gelten, mit Ausnahme der in Form stabiler Anionen vorliegenden C_{inorg} , Cl, Se, Mo, I und Po. Die Korrektheit dieser Annahme ist fraglich. Je nach Beschaffenheit der diffundierenden Spezies mag der effektive Diffusionskoeffizient von $10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ für gewisse Radionuklide eine konservative Näherung darstellen, für andere aber unterschätzt sein. Aufgrund des heutigen Wissensstandes ist zu erwarten, dass der von der Nagra gewählte pessimistische Diffusionskoeffizient von $10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ diese Ungewissheiten abdeckt.

Die Diffusionsmessungen von Cl^- und I^- an Proben vom Felslabor Mont Terri und von der Bohrung Benken bilden eine gute Grundlage für das Verständnis der Diffusion stabiler Anionen im Opalinuston. Die Messungen aus dem Mont Terri ergaben allerdings durchwegs höhere Diffusionskoeffizienten als die Messungen an den Proben aus der Bohrung Benken. Die Nagra hat einen durchschnittlichen Wert von $10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ als Referenzwert gewählt. Der pessimistische Wert von $3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ erscheint der HSK aufgrund der Streuung der experimen-

tellen Daten eher niedrig. Weitere, von der Nagra in Aussicht gestellte Messungen werden die Ungewissheiten vermindern können.

Die von der Nagra gewählten Porositäten sind ebenfalls nachvollziehbar und plausibel. Die tiefere Diffusionsporosität für Anionen erklärt sich aus dem reduzierten Porenraum, der den Anionen aufgrund der negativen Strukturladungen im Opalinuston zur Verfügung steht. Auch die Unterscheidung zwischen Diffusion senkrecht zur Schichtung und Diffusion parallel zur Schichtung ist experimentell gut unterlegt. Sicherheitsrelevant ist allerdings nur die Diffusion senkrecht zur Schichtung, da dieser Transportpfad auf dem kürzesten Weg aus dem Wirtgestein hinausführt. Die Mitberücksichtigung der Diffusion parallel zur Schichtung würde aufgrund der längeren Transportzeiten zu einer Verminderung der Dosis führen. Dies rechtfertigt den Verzicht der Nagra auf pessimistische Diffusionskoeffizienten parallel zur Schichtung.

Die HSK empfiehlt der Nagra, im Fall einer Weiterführung des Projekts das Diffusionsverhalten weiterer Radionuklide im Opalinuston zu untersuchen, damit realistischere Voraussagen über D_e gemacht und Unsicherheiten abgebaut werden können.

4.7.5 Gastransport im Wirtgestein

In den BE/HAA-Lagerstollen wird das durch Korrosion produzierte Gas durch die Bentonitverfüllung an den Rand des Wirtgesteins transportiert (siehe Abschnitt 4.5.3.4). In den LMA-Lagertunneln kann im verfüllenden Zementmörtel ein Teil des produzierten Gases gespeichert werden, ein Gastransport bis zum umliegenden Wirtgestein ist durch den porösen Zement gegeben (siehe Abschnitt 4.6.7). Die Möglichkeiten des Weitertransportes des Gases im Wirtgestein sind entscheidend, um abzuklären, ob der Gasdruck am Übergang vom Nahfeld zum Wirtgestein unter Rissbildung zu einer irreversiblen Beschädigung des Wirtgesteins führt.

Angaben der Nagra

Die Ausführungen der Nagra zur Problematik des Gastransports im Wirtgestein finden sich in allen drei Hauptberichten zum Entsorgungsnachweis (NTB 02-02, NTB 02-03 und NTB 02-05), in NTB 02-06 sowie in einer Zusammenfassung in NTB 04-06. Die Nagra hat für den Gastransport durch das Wirtgestein vier Prozesse berücksichtigt, die sich vor allem durch ihre Transportkapazität unterscheiden:

- In Wasser gelöstes Gas wird diffusiv und advektiv entlang der bestehenden hydraulischen Pfade transportiert. Da der Opalinuston eine sehr tiefe hydraulische Durchlässigkeit aufweist und kaum eine Porenwasserbewegung vorhanden ist, ist wie bei den Radionukliden die Diffusion und Advektion des transportierten Gases stark eingeschränkt und richtungsabhängig.
- Beim visko-kapillaren Zweiphasenfluss erfolgt der Gastransport in nicht-gelöster Form (d.h. in der Gasphase) entlang der hydraulischen Wegsamkeiten. Das Eintreten des Gases in einen Fliessweg im Wirtgestein benötigt einen Minimaldruck (Gaseintrittsdruck), der von der Porengrösse des Gesteins abhängig ist (Davies 1991, Horseman 2001). Das durchflossene Gestein verhält sich linear elastisch, d.h. die Wegsamkeiten werden beim Gasdurchfluss reversibel erweitert, aber nicht irreversibel verletzt. Aufgrund von experimentellen Versuchen und Modellrechnungen mit dem Programm

TOUGH2 wurden die wichtigen Parameter zum Zweiphasenfluss im Opalinuston abgeschätzt (NTB 02-03, S. 343), darunter auch der für diesen Prozess notwendige Gaseintrittsdruck. Die Menge an transportiertem Gas bei Drücken oberhalb des Gaseintrittsdrucks ist um mehr als drei Grössenordnungen höher als die durch Diffusion und Advektion im Porenwasser gelöst transportierten Gasmengen (vgl. Fig. 5.9-6 in NTB 02-03).

- Mit steigendem Gasdruck findet aus dem Zweiphasenfluss heraus ein kontinuierlicher Übergang in den durch Dilatanz kontrollierten Gasfluss statt. Bei Druckwerten, die wenig unterhalb der kleinsten Hauptspannungskomponente des Wirtgesteins liegen, findet eine deutlich stärkere Erweiterung der Poren und Fliesswege statt (als Mikrorisse charakterisiert). Die Mikrorisse schliessen unter sinkendem Druck wieder, sodass die hydraulische Leitfähigkeit unterhalb des Gaseintrittsdrucks wieder dieselbe ist wie vor der Rissentstehung. Die Nagra geht davon aus, dass die durch Mikrorisse entstehenden Wegsamkeiten aufgrund der Spannungsverhältnisse im Gestein und der strukturellen Anisotropie der Richtung der Schichtflächen folgen (Fig. 5.2-1a und b in NTB 04-06).
- Bei Gasdrücken, die die Summe der Werte der kleinsten Hauptspannungskomponente (σ_3) und der Zugspannungsfestigkeit des Wirtgesteins übersteigen, oder bei sehr rascher Druckzunahme ist mit der Bildung von Makrorissen zu rechnen, die eine irreversible Veränderung des Wirtgesteins verursachen. Die hydraulische Leitfähigkeit wird durch die Makrorisse längerfristig erhöht. Einen aufgrund rascher Druckzunahme entstehenden Riss (Zugriss) schliesst die Nagra im vorliegenden Fall aufgrund der vorhandenen Gasproduktionsraten aus.

Der diffusiv/advektive Abtransport des Gases im Porenwasser ist im Verhältnis zur Produktionsrate ungenügend, um einen Druckaufbau zu verhindern (NTB 02-05, S. 155). Der Druckaufbau beginnt bereits während der Aufsättigung des Bentonits (BE/HAA-Lagerstollen) bzw. des Zementmörtels (LMA-Lagertunnel). Für den Beginn von Zweiphasenfluss, Dilatanz und Makrorissbildung sind gemäss den vorliegenden Experimenten Druckwerte von 11.5 (Gaseintrittsdruck), 13 und 17.5 MPa erforderlich. Beim Transport mit Dilatanz können bei Drücken nahe dem Auftreten erster Makrorisse grosse Mengen an Gas in den durch Mikrorisse erweiterten Porenraum aufgenommen werden, von wo sie durch vertikale Diffusion entweichen können. Die Gasmengen, die mit diesem Prozess maximal abtransportiert werden können, sind grösser als diejenigen, die in den konservativen Gasbildungsszenarien der Nagra produziert werden, so dass von der Nagra in allen unter Berücksichtigung der Dilatanz gerechneten Modellen die Bildung von Makrorissen ausgeschlossen wird.

Die Modellierungen der Nagra zur zeitlichen Entwicklung des Gasdrucks zeigen aufgrund der verwendeten Annahmen und Rahmenbedingungen unterschiedliche Resultate. Gemäss dem vereinfachten eindimensionalen Modell von Poppei et al. (2002) lässt sich auch bei konservativeren Annahmen zur Gasproduktion vermuten, dass die maximal erreichbaren Gasdrücke um die BE/HAA-Lagerstollen etwa bei 10 MPa liegen, also deutlich unterhalb des für die Bildung von Mikrorissen notwendigen Gasdrucks. Bei zusätzlicher Berücksichtigung des anfänglichen Wärmepulses zeigen sich für die ersten 1'000 Jahre höhere Drücke, für die folgende Zeit aber praktisch unveränderte Resultate. Die Ergebnisse einer 2D-Modellierung (NTB 04-06) zeigen, dass sich nach ca. 20'000 Jahren um die BE/HAA-Lagerstollen eine horizontale Zone ausgebildet hat, in der der für die Dilatanz kritische Druck von 13 MPa erreicht wird. Unter Berücksichtigung von Diffusion, Zweiphasenfluss und Dilatanz wird der

für die Makrorissbildung kritische Gasdruck von 17.5 MPa hingegen nie erreicht. Die Nagra verweist ausserdem auf Literaturdaten, nach denen eine Reaktivierung von existierenden Klüften nur im Tiefenbereich von wenigen hundert Metern relevant ist (NTB 02-03, S. 350).

Die Gasdrücke aus dem LMA-Lager wurden getrennt vom BE/HAA-Lager berechnet. Für den Opalinuston im Bereich der LMA-Lagertunnel ergeben sich nach Poppei et al. (2002) maximale Drücke unter 10 MPa. Aus diesem Modell wird vornehmlich ein Gastransport durch Diffusion und Advektion und ein Verdrängen des Porenwassers aus dem Zementmörtel erwartet (vgl. Abschnitt 4.6.7). Auf der Basis der 2D-Modellrechnungen in NTB 04-06 lassen sich unter Berücksichtigung von Gasdiffusion und -advektion, Zweiphasenfluss und Dilatanz um das LMA-Lager maximale Drücke von knapp über 13 MPa erwarten. Das LMA-Lagersystem erweist sich in diesen Modellrechnungen auch unter der Annahme einer Erhöhung der Korrosionsraten und einer Reduktion der Gaspermeabilität als relativ robust, so dass es auch unter stark konservativen Verhältnissen nie zum Erreichen von Drücken kommt, mit denen eine Makrorissbildung im Opalinuston wahrscheinlich wird. Die Ergebnisse wurden mit anderen, unabhängigen Modellen verifiziert (Smith 2004).

Die Nagra definiert zwei Zonen der exkavationsbedingten Auflockerung im Opalinuston (EDZ-i und EDZ-o, NTB 04-06, S. 47), die sich in ihren Permeabilitäten und daher auch den Gaseintrittsdrücken unterscheiden. Die für den Gastransport relevanten Parameter wurden für die EDZ nicht experimentell bestimmt. Die EDZ hat ein beschränktes Potenzial, selber Gas zu speichern; dieses Potenzial ist gemäss Abschätzungen der Nagra nicht ausreichend, um den sich aufbauenden Druck in beiden Lagerteilen in entscheidendem Masse zu reduzieren. Für die EDZ werden nach erfolgter Aufsättigung 10 (EDZ-o) bzw. 50-mal (EDZ-i) höhere Permeabilitäten als jene des ungestörten Gesteins abgeschätzt. Als Transportwege für Gas können die EDZ jedoch nur beschränkt wirken, da sie durch die Versiegelungen an den Stollen- bzw. Tunnelenden unterbrochen werden.

Die Nagra unterscheidet in ihrer Betrachtung des Gastransports jedoch nicht zwischen der EDZ und dem intakten Wirtgestein. Die Nagra begründet den Schritt der Vernachlässigung der EDZ mit den bis jetzt fehlenden Experimenten und damit, dass sich die EDZ aufgrund der Wiederaufsättigung mit Porenwasser, des Kriechens des Tongesteins sowie, in den BE/HAA-Lagerstollen, des Quelldrucks der Bentonitverfüllung zumindest teilweise wieder ausheilen wird. Der zeitliche Rahmen dieser Ausheilung der EDZ ist unklar, die Annahme einer ausgeheilten EDZ ist bezüglich der Gasdruckentwicklung die konservativste.

Die Tunnelverfüllungen aus einer Mischung mit 30 % Bentonit und 70 % Sand hinter den Versiegelungen der BE/HAA-Lagerstollen und LMA-Lagertunnel können als Gasauffangreservoir angesehen werden. Diese Tunnelverfüllung hat eine Porosität von 0.3-0.4 und besitzt Gaseintrittsdrücke von 1-2 MPa, die zur Bildung eines Zweiphasenflusses notwendig sind (NTB 04-06, S. 40).

Das anhand der beschriebenen Vorgänge durch den Opalinuston transportierte Gas wird in den Wedelsandstein geführt. Gas aus dem Tiefenlager kann auch über die versiegelten Zugänge (Rampe und Schacht) zum Tiefenlager in den Wedelsandstein gelangen. Im Wedelsandstein wird das Gas gespeichert und durch lateralen Transport verdünnt. Für den Wedelsandstein wird ein Gaseintrittsdruck von 0.2 MPa angegeben. Der Wedelsandstein fungiert aufgrund seiner Porosität als Gasspeicher; die Nagra geht davon aus, dass das in diese Schicht einströmende Gas sich schichtintern ausbreiten wird. Alternativ dazu könnte das Gas

auch via vertikale Störungen in den darüber liegenden Malm transportiert und dort weiter verdünnt und abtransportiert werden.

Die Nagra kommt aufgrund von Experimenten (z.B. Horseman und Harrington 2002) und Berechnungen (z.B. Poppei et al. 2002) zum Schluss, dass sich das im Tiefenlager gebildete Gas durch Zweiphasenfluss ausbreiten wird. Nur bei stark konservativen Annahmen ist ein durch Dilatanz dominierter Gastransport möglich. Die Nagra schliesst das Erreichen von Drücken oberhalb der minimalen Hauptspannung und damit die Gefahr einer irreversiblen Makrorissbildung aus. Der Transport via Zweiphasenfluss hat gemäss Nagra hinreichende Kapazität, um die entstehenden Gase ohne zu hohen Druckaufbau durch den Opalinuston abzuführen.

Beurteilung der HSK

Die HSK ist im Allgemeinen mit den von der Nagra verwendeten Modellen und Parametern einverstanden. Die gemachten Abschätzungen und Annahmen sind, bis auf wenige nachfolgend besprochene Ausnahmen, vernünftig gewählt. Die von der Nagra berücksichtigten Prozesse für den Gastransport im Opalinuston erscheinen aus Sicht der HSK mit wenigen Ausnahmen keine wesentlichen Lücken aufzuweisen. Die zeitlichen Abläufe belegen, dass die maximalen Gasmengen und Gasdrücke erst nach dem Abklingen des Temperaturpulses zu erwarten sind. In den Berechnungen der Nagra sind einige Konservativitäten eingebaut, die in dieser Form und Kombination kaum auftreten dürften. Trotz dieser Konservativitäten liegt das Ergebnis der Berechnungen in einem Bereich, in dem Makrorisse ausgeschlossen werden können.

In Emch+Berger (2005) wird neben den erwähnten Prozessen bei der Gasproduktion zusätzlich auf den Einfluss der Wasserzehrung hingewiesen: Die chemischen Reaktionen der Metallkorrosion verbrauchen Wasser, was über die Volumenbilanz eine zusätzliche Abnahme der Gasdrücke bewirkt (Lassabatère et al. 2004). Die von Emch+Berger (2005) durchgeführten Überlegungen zur Gasproduktion kommen zum Ergebnis, dass unter Berücksichtigung der Wasserverzehrung der Zweiphasenfluss allein genügt, um das entstehende Gas durch das Wirtgestein wegzutransportieren. Somit ist nicht mit der Bildung von Mikrorissen (Dilatanz) zu rechnen. Die auf Hinweis der HSK-Experten neu erstellten Berechnungen der Nagra (Marschall et al. 2005) zeigen deutlich, dass die Berücksichtigung der Wasserzehrung den Druckaufbau signifikant reduziert und selbst bei einer konservativen Gasdurchlässigkeit des Opalinustons von $1 \cdot 10^{-14}$ m/s exzessive Drücke oberhalb 15 MPa unrealistisch sind.

Die Nagra nimmt für alle im Lager entstehenden Gase die gleichen Transporteigenschaften an. Es muss aber vermutet werden, dass H_2 , CH_4 , und CO_2 sich im Tongestein verschieden verhalten. Hildenbrand et al. (2004) zeigen auf, dass z.B. die Eintrittsdrücke in Tongesteine stark von der Art des Gases abhängen. Da speziell für das LMA-Lager sich vor allem zwei unterschiedliche Gasspezies (H_2 und CH_4) langfristig in ihrer relativen Produktionsrate abwechseln, ist mit sich ändernden Transportparametern zu rechnen. Die von der Nagra initiierten Experimente zum Gasfluss im Opalinuston (Horseman und Harrington 2002) basieren auf der Verwendung von He. Eine direkte Übertragung der Resultate von He auf H_2 ist in qualitativer Art, aber nicht unbedingt in quantitativer Art nachvollziehbar, da die Molekülgrösse nicht der allein zu berücksichtigende Faktor ist.

Weiter weist die HSK darauf hin, dass in den verschiedenen Modellen der Beginn des Zweiphasenflusses bzw. der Mikrorissbildung an die Minimalgasdrücke von 11.5 respektive 13 MPa gebunden ist. Der erste Wert ist von der Porengrösse abhängig und dadurch mit der intrinsischen Gesteinspermeabilität korreliert (Davies 1991, Horseman und Harrington 2002). Er hängt somit von der lokalen Lithologie des Opalinustons (NTB 02-03, S. 321) ab. Der zweite Wert ist auch vom tektonischen Spannungszustand des Gesteins abhängig. Die Gaseintrittsdrücke, die als wichtige Parameter in die Modellierung der Gasmigration einfließen, sind in mehreren Experimenten in der Bohrung Benken und im Felslabor Mont Terri untersucht worden, wobei sich eine grosse Streuung der beobachteten Gaseintrittsdrücke gezeigt hat. Im Falle einer Fortführung des Projektes sollte die Nagra die zurzeit noch etwas geringe und zum Teil widersprüchliche Datenbasis zu den Gasdurchlässigkeiten und Gaseintrittsdrücken des Opalinustons verbessern. Das bezieht sich auch auf die von der Nagra nicht weiter begründete Annahme, dass die Gastransportkapazität infolge des Auftretens von Dilatanz beim Druckanstieg von 13 bis 15 MPa um einen Faktor 10 linear zunimmt (NTB 02-03, S. 354). Wichtig ist zu zeigen, dass eine irreversible Makrorissbildung ausgeschlossen werden kann.

Die Ausdehnung der durch Diffusion entstehenden pH-Fahne um die LMA-Lagertunnel wird von der Nagra auf maximal 4 m geschätzt (NTB 02-03, S. 486). Gemäss NTB 04-06 (Fig. 5.2-4) ist nach etwa 10^4 Jahren mit einer Verdrängung des Porenwassers aus der Zementverfüllung zu rechnen. Da die Tonminerale des Opalinustons gegenüber den pH-Werten des verdrängten Wassers instabil sind (Mäder 2003), ist entlang der Transportwege des verdrängten Wassers mit chemischen Umwandlungsprozessen zu rechnen. Durch die filigrane Geometrie des Porenraumes können bereits geringe Ausfällungen einen starken Einfluss auf die Durchlässigkeit haben. Die Nagra verweist auf Langzeitexperimente (Adler 2001), bei denen die hydraulische Leitfähigkeit nach langer Versuchsdauer rasch auf Null sank und dennoch keine Abnahme des Porenraumes gemessen und keine typischen Umwandlungsprodukte wie Ca-Si-Hydrate und Zeolithe nachgewiesen werden konnten (NTB 02-03, S. 484). Die Nagra erwägt für solche Ausfällungen die Möglichkeit einer Versiegelung des Porenraumes im unmittelbar angrenzenden Wirtgestein (NTB 02-03, S. 487). Eine solche Versiegelung könnte einen signifikanten Einfluss auf den Gasfluss in den Opalinuston und damit auf die Druckentwicklung um das LMA-Lager haben. Im Falle einer Weiterführung des Projekts sollte die Nagra die Entwicklung der Porosität und der Durchlässigkeit des Wirtgesteins innerhalb der pH-Fahne eingehend untersuchen und dabei die Konsequenzen für den Gastransport durch den tunnelnahen Opalinuston evaluieren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die HSK bezüglich Gasmigration im Opalinuston zum Schluss kommt, dass die Nagra das Problem des Gastransportes umfassend angegangen hat. Die von der HSK erkannten offenen Fragen werden dadurch relativiert, dass die Nagra in konservativer Weise von einer kontinuierlich maximalen Gasproduktion ausgeht und die Wasserzehrung nicht berücksichtigt hat. Bezüglich des LMA-Lagers ist die Frage zu klären, inwiefern das aus den Lagertunneln verdrängte alkalische Wasser im umliegenden Wirtgestein die Gastransporteigenschaften verändert. Für diverse ermittelte Gasrelevante Parameter soll bei einer allfälligen Fortsetzung des Projektes eine umfassendere und konsistentere Datenbasis geschaffen werden. Die HSK stellt trotz dieser offenen Punkte fest, dass der von der Nagra aufgestellte Nachweis generell robust ist und zeigt, dass irreversible Schäden im Wirtgestein durch die auftretenden Gasdrücke nicht zu erwarten sind.

4.7.6 Barrierenwirkung des Wirtgesteins

Die HSK beurteilt in diesem Abschnitt die Barriereneigenschaften des Opalinustons. Die Barrierenwirkung des Wirtgesteins hängt von den nuklidspezifischen Sorptionskoeffizienten, dem für die jeweilige Nuklidart aufgrund der chemischen Form verfügbaren Porenraum und den Diffusionskoeffizienten ab. Die Porosität des Wirtgesteins beträgt im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland 5 - 15 %. Das Porenwasser ist aufgrund der nach der Sedimentation erfolgten Kompaktierung auf sehr viele, dafür äusserst kleine Poren verteilt. Wegen der kleinen Porengrösse und des hohen Tonanteils im Opalinuston ist die hydraulische Durchlässigkeit stark reduziert.

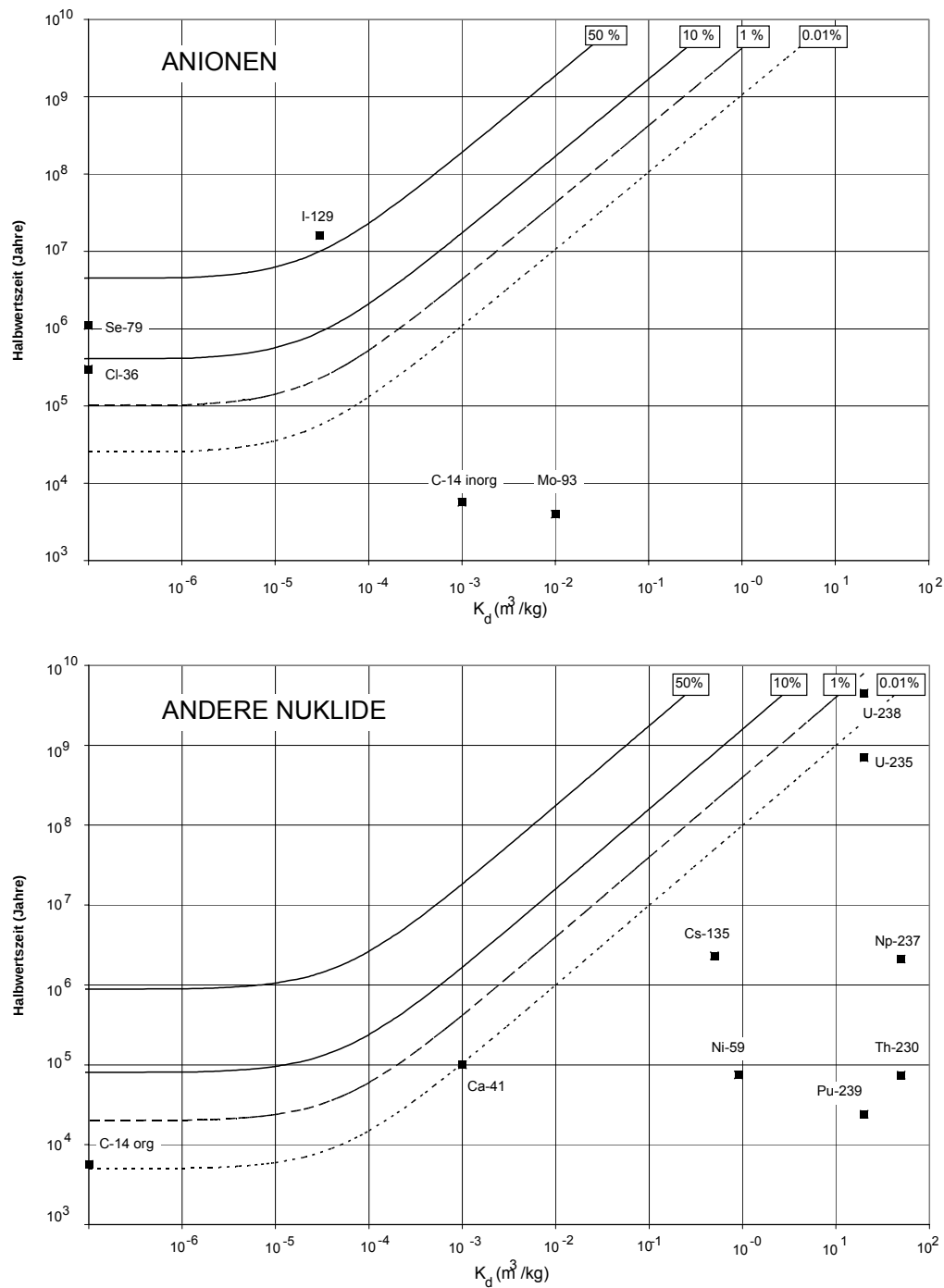
Der Opalinuston stellt eine wirksame Barriere für den Transport der meisten sicherheitsrelevanten Nuklide dar. Die gute Barrierenwirkung beruht darauf, dass der bereits geringe diffusive und advective Nuklidtransport im Opalinuston durch die Sorption zusätzlich verlangsamt wird. Falls die von einem Radionuklid zur Durchquerung des Opalinustons benötigte Zeit um ein Vielfaches grösser ist als dessen Halbwertszeit, zerfällt der überwiegende Anteil dieses Radionuklids während des Transportes durch das Wirtgestein (Siehe Figur 4.7-1).

Die Rückhalteeigenschaften des Opalinustons sorgen dafür, dass bloss langlebige, schwach sorbierende Nuklide wie ^{129}I , ^{79}Se und ^{36}Cl das Wirtgestein in den in der Sicherheitsanalyse relevanten Zeiten durchqueren können. Die Freisetzung dieser Nuklide in die Biosphäre wird durch das Wirtgestein zwar zeitlich verzögert, aber nicht verhindert. Stärker sorbierende Nuklide wie die langlebigen Actiniden (z.B. ^{238}U und ^{232}Th) und auch die schwach sorbierenden, aber kurzlebigen Nuklide (z.B. organisches ^{14}C und ^{41}Ca) benötigen für die Durchquerung des Opalinustons rund 100-mal länger als ihre jeweilige Halbwertszeit. Im Falle von ^{238}U und ^{232}Th wären dies Hunderte von Millionen Jahre, Zeiträume die weit jenseits der für die Sicherheitsanalyse relevanten Zeiten sind.

4.7.7 Barrierenwirkung der Rahmengesteine

Angaben der Nagra

Als Rahmengesteine bezeichnet die Nagra die geringdurchlässigen, vorwiegend tonig-mergeligen Gesteinsabfolgen zwischen dem Opalinuston und den regionalen Aquiferen Malm (oben) und Muschelkalk (unten). Die Nagra berücksichtigt im Referenzfall der Sicherheitsanalyse als geologische Barriere nur den Opalinuston mit einer Migrationsstrecke der Nuklid-ausbreitung von 40 m. Die Radionuklide werden im Referenzfall nach Austritt aus dem Opalinuston instantan als in die Biosphäre freigesetzt betrachtet. Den tonig-mergeligen Rahmengesteinen unterhalb und oberhalb des Opalinustons wird keine Verzögerung oder Barrierenwirkung zugeordnet. Die Nagra begründet ihr Vorgehen damit, dass eine belastbare Charakterisierung der Rahmengesteine heute wegen der geringen Datenbasis noch nicht möglich ist.



Figur 4.7-1: Wirksamkeit des Opalinustons als Ausbreitungsbarriere. Die Linien zeigen in Abhängigkeit des Sorptionskoeffizienten und der Halbwertszeit eines Radionuklids den Anteil des Nuklidflusses, der in einem stationären Zustand die Wirtgesteinsbarriere durchqueren würde. Eingetragen sind einige sicherheitsrelevante Nuklide mit den von der Nagra verwendeten Referenzsorptionswerten (Siehe auch Figur 6.7-9 in NTB 02-05).

Als alternative Konzeptualisierung innerhalb des Referenzszenariums (siehe Abschnitt 4.10.3) hat die Nagra den Einfluss der umgebenden tonig-mergeligen Rahmengesteine auf die Nuklidausbreitung analysiert. Sie unterscheidet dabei zwei Varianten:

- In der ersten Variante nimmt die Nagra an, dass der Wedelsandstein und der Sandsteinkeuper hydraulisch nicht leitend sind. Die tonig-mergeligen Malm-Dogger Gesteine im Hangenden und die tonreichen und gipshaltigen Gesteine des Lias und Keupers im Liegenden des Opalinustons bilden dann eine zusätzliche geringdurchlässige Migrationsbarriere ($K_v = 10^{-13}$ bzw. $2 \cdot 10^{-14}$ m/s) und die Exfiltration erfolgt über die regionalen Aquifere des Malms und des Muschelkalkes. Die Mächtigkeit der Migrationsbarriere erhöht sich damit im Hangenden des Lagers auf 140 m und im Liegenden auf 200 m.
- Die zweite Variante geht davon aus, dass der Wedelsandstein und der Sandsteinkeuper Aquifercharakter aufweisen und die Entwässerung grundsätzlich entlang dieser Grundwasserleiter erfolgt. Der Radionuklidtransport erfolgt advektiv/dispersiv entlang dieser Exfiltrationspfade, woraus Transportweglängen von 25 km (Wedelsandstein) bzw. 15 km (Sandsteinkeuper) bis zur Biosphäre resultieren. Im geklüfteten Wedelsandstein wird zusätzlich Matrixdiffusion mitberücksichtigt. Die Nagra geht bei ihren Ausbreitungsrechnungen vereinfachend davon aus, dass die oben erwähnten geringdurchlässigen Rahmengesteine dieselben Sorptions- und Diffusionseigenschaften wie der Opalinuston aufweisen.

Beurteilung der HSK

Die HSK beurteilt das Vorgehen der Nagra aufgrund des vorgelegten und bezüglich der Rahmengesteine noch unvollständigen Datensatzes als vertretbar. Bei den zwei untersuchten Varianten nimmt die Nagra an, dass die Rahmengesteine in erster Näherung ähnliche Transporteigenschaften wie der Opalinuston aufweisen. Der Nuklidtransport findet auch hier hauptsächlich durch Diffusion statt. Für langlebige, schwach sorbierende Nuklide bilden die Rahmengesteine zwar keine undurchdringbare Barriere, doch sie verzögern den Durchbruch der Nuklide in die Biosphäre zusätzlich.

Die Konsequenzanalyse der untersuchten Varianten zeigt, dass gegenüber dem Referenzfall die maximalen Dosen in der ersten Variante um rund einen Faktor 2 und in der zweiten Variante um einen Faktor 14 kleiner sind. Die HSK beurteilt die dargelegten Analysenergebnisse als nachvollziehbar und plausibel. Mit den oberen und unteren tonig-mergeligen Rahmengesteinen verfügt das Lagersystem über potenzielle weitere Barrierenelemente, die nach Ansicht der HSK bei einer Weiterführung des Projektes und bei einer Verbesserung der Datengrundlagen in den Referenzfall der Sicherheitsanalyse einbezogen werden sollten.

4.8 Das Mehrfachbarrierensystem

Das Sicherheitskonzept des Tiefenlagers sieht mehrere Barrieren vor, die auf unterschiedliche Weise zum Einschluss der Radionuklide beitragen (siehe dazu Abschnitt 4.2). Diese Barrieren beeinflussen sich gegenseitig. Die wichtigsten der im Projekt Opalinuston betrachteten Barrieren werden im vorliegenden Abschnitt unter dem Aspekt Mehrfachbarrierensystem untersucht. Das sind: die Abfallmatrix, der Endlagerbehälter, die Verfüllung, das Wirtgestein Opalinuston sowie die Versiegelung der Zugänge.

4.8.1 Charakteristiken eines Mehrfachbarrierensystems

Die Kernenergiegesetzgebung und die Richtlinie HSK-R-21 verlangen, dass die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers durch gestaffelte passive Sicherheitsbarrieren gewährleistet wird. Die Sicherheitsbarrieren sollen verschiedener Art sein und sowohl technische wie auch natürliche Komponenten enthalten. Zusätzlich erwartet die HSK bei einem Mehrfachbarrierensystem, dass eine unerwartete Schwächung einer beliebigen Barriere durch die weiteren Barrieren derart aufgefangen wird, dass weiterhin mit keinen unzulässigen radiologischen Auswirkungen gerechnet werden muss. Diese Interpretation des Begriffs „Mehrfachbarrierensystem“ ist auch international gebräuchlich (NEA 2000b).

4.8.2 Wirkung der einzelnen Barrieren

Es werden hier nur die eingangs erwähnten Barrieren betrachtet. Im Abschnitt 4.2 wurde auf zusätzliche Barrieren hingewiesen, deren Wirkung aber im Nachweis der Langzeitsicherheit eine untergeordnete Rolle spielt. Die Aussagen stützen sich weitgehend auf die Diskussion des Verhaltens der Barrieren in den vorangehenden Abschnitten. Teilweise wird auf Ergebnisse der Nuklidausbreitungsberechnungen im Abschnitt 4.11 vorgegriffen. Wenn nicht anders vermerkt, wird der Referenzfall der Szenarienanalyse vorausgesetzt.

Abfallmatrix:

- HAA: Durch die langsame Auflösung der Glasmatrix werden die Radionuklide über eine lange Zeit verteilt freigesetzt. Im Referenzfall dauert die Auflösung einige Hunderttausend Jahre. Während dieser Zeit zerfällt ein grosser Teil der Radionuklide, die meisten ohne die Glasmatrix verlassen zu haben. Die Freisetzung ist weitgehend stöchiometrisch, das heisst *pro rata* der in der Glasmatrix enthaltenen Menge der einzelnen Radionuklide.
- BE: Für den grössten Teil der im Brennstoff enthaltenen Radionuklide gilt die gleiche Aussage wie für den HAA. Die Auflösungszeit ist hier aber wesentlich länger und beträgt rund 10^8 Jahre. Für einen Teil des Inventars an Spaltprodukten und leichten Radionukliden erfolgt die Freisetzung rasch (IRF, siehe Abschnitt 4.5.1.1) und in je nach Nuklid unterschiedlicher Menge. Dieser rasch freigesetzte Anteil der Radionuklide ist für die maximale Dosis aus dem Tiefenlager verantwortlich.
- LMA: Diese Abfälle sind vielfältiger Art. Die Abfallmatrix besteht hauptsächlich aus Zement oder Bitumen. Für den Nachweis der Langzeitsicherheit wird von der Rückhaltung in der Abfallmatrix kein Gebrauch gemacht. Die Zementmatrix trägt zusammen mit der Zementverfüllung der LMA-Lagertunnel zur Stabilisierung eines sehr hohen pH-Wertes bei, der in Bezug auf die Sorption von Radionukliden günstig ist.

Behälter:

- HAA: Die Behälter sorgen für einen absoluten Einschluss der Abfallmatrix während mindestens 10'000 Jahren. Erst nach dieser Zeit setzt die Auflösung der Abfallmatrix ein. Nach 10'000 Jahren ist die Aktivität des HAA auf rund 0.03 % abgeklungen.
- BE: Die Behälter sorgen für einen absoluten Einschluss der Abfallmatrix während mindestens 10'000 Jahren (Stahlbehälter) oder 100'000 Jahren (Kupfer/Eisen-Behälter). Das heisst insbesondere, dass auch die oben erwähnte IRF des Radionuklidinventars

erst nach 10'000 Jahren aus dem Behälter treten kann. Die Aktivität der BE nimmt in den 10'000 Jahren des intakten Stahlbehälters auf rund 0.3 % und in 100'000 Jahren auf rund 0.03 % ab.

- LMA: Im Referenzfall wird eine 100-jährige Einschlusszeit angenommen, mit der die Rückhaltung aufgrund der Verfestigungs- und Verpackungsmassnahmen und der Tatsache, dass die Aufsättigung der Lagertunnel nur langsam verläuft, berücksichtigt wird.

Bentonitverfüllung:

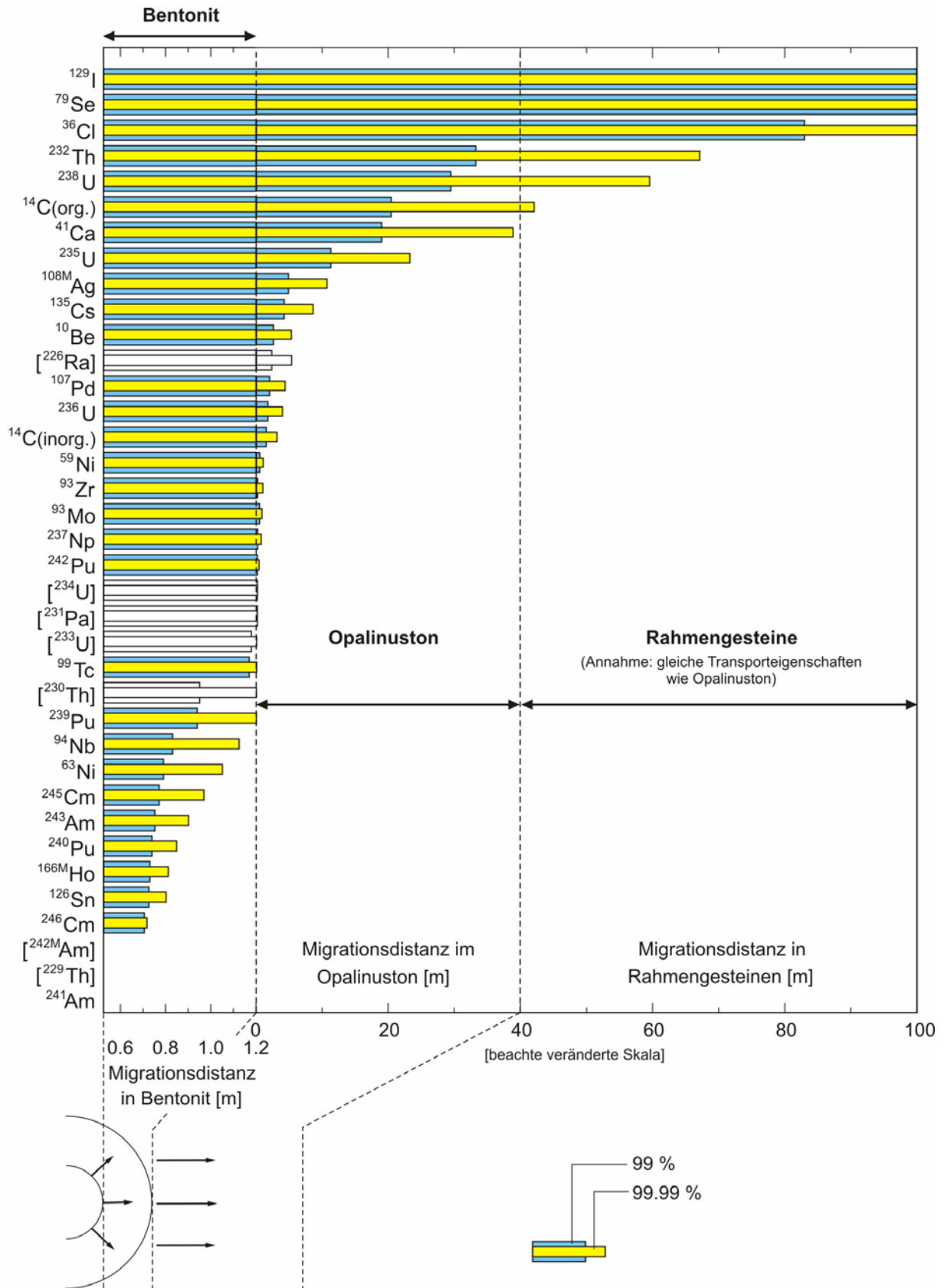
- Unter Bentonitverfüllung wird die Verfüllung der Lagerstollen für BE und HAA mit Bentonitgranulat verstanden. Der Bentonit hat eine sehr geringe Durchlässigkeit für Wasser. Die Nuklidausbreitung im Bentonit findet deshalb durch Diffusion statt. In der Nähe des Behälters wird die Konzentration vieler Radionuklide durch Löslichkeitslimiten begrenzt. Dadurch entsteht eine zusätzliche Barrierenwirkung, indem der für die Diffusion wirksame Konzentrationsgradient einen entsprechenden Maximalwert nicht überschreiten kann. Die Wirksamkeit der Bentonitverfüllung lässt sich anschaulich an der Figur 4.8-1 ersehen, die anhand einer angenommenen konstanten Quelle von Radionukliden zeigt, welcher Anteil jeder Nuklidsorte die Bentonitbarriere durchqueren kann.

Zementverfüllung:

- Die Zementverfüllung der LMA-Lagertunnel sorgt für stabile Verhältnisse mit hohem pH-Wert, woraus sich für viele Nuklide tiefe Löslichkeiten sowie günstige und langfristig stabile Sorptionswerte ergeben, die die Freisetzung limitieren.

Opalinuston:

- Dank der sehr geringen Durchlässigkeit ist der Nuklidtransport im Opalinuston stark durch Diffusion geprägt. Die nächstgelegene möglicherweise wasserführende Schicht befindet sich in rund 40 m Entfernung von den Lagerstollen und -tunneln. Die Berechnungen der HSK zeigen, dass mit den Annahmen der Nagra zum hydraulischen Gradienten der Beitrag der Advektion zur Nuklidausbreitung kleiner ist als der Beitrag aus der Diffusion, aber noch innerhalb der gleichen Grössenordnung. Die geringe Advektion, die Diffusion über eine grosse Distanz bei kleinen Diffusionskoeffizienten sowie die Sorption auf dem Migrationsweg führen zu stark verzögertem Austritt der Nuklide aus dem Opalinuston. Während der Migration durch den Opalinuston zerfällt ein grosser Teil der Nuklide, die eine kürzere Halbwertszeit haben als die typischerweise mehr als 10^6 Jahre, die für die Migration benötigt werden.



Figur 4.8.-1: Migrationsstrecke der Radionuklide im Bentonit und im Wirtgestein, auf der im stationären Zustand der Nuklidfluss aufgrund des radioaktiven Zerfalls während des Transports um 99 % (breite Balken) bzw. 99.99 % (schmale Balken) reduziert wird (aus NTB 02-05).

Streckenverfüllungen und Versiegelungen:

- Hier sind die Verfüllungen aller unterirdischen Räume ausser den Lagerstollen und Lagertunneln (z.B. Zugangsrampe, Schacht, Bau-, Betriebs- und Verbindungsstollen) sowie die eingebauten Versiegelungen angesprochen (siehe Abschnitt 3.5). Das System dieser unterirdischen Räume stellt einen Freisetzungsweg für die aus dem Nahfeld ausgetretenen Radionuklide dar, auf dem sie die Opalinustonbarriere umgehen könnten. Die Verfüllungen und Versiegelungen haben deshalb eine ähnliche Rolle als Migrationsbarriere zu übernehmen wie der Opalinuston. Die Nagra beschreibt das Konzept der Verfüllung und Versiegelung in NTB 02-02 und Sitz (2002). Gemäss Nagra hat die Verfüllung die geringe hydraulische Durchlässigkeit von $5 \cdot 10^{-11}$ m/s. Die Versiegelungen sollen hydraulische Durchlässigkeiten im Bereich 10^{-13} bis 10^{-11} m/s aufweisen und müssen auch dem sich in den versiegelten Stollen aufbauenden Gasdruck standhalten. Die Nagra hat das Rückhaltevermögen der Verfüllungen und der Versiegelungen in einigen Rechenfällen untersucht (siehe Abschnitt 4.10).

4.8.3 Zusammenwirken und Verträglichkeit der Barrieren

Die Barrieren sind voneinander abhängig und unterstützen sich in mannigfacher Weise. In Abschnitt 4.2 wurde auf die Schutzwirkung der äusseren auf die inneren Barrieren hingewiesen und Beispiele weiterer Abhängigkeiten genannt. Hier genügt deshalb eine kurze Aufzählung, die sich ausschliesslich auf die in diesem Abschnitt betrachteten Hauptbarrieren bezieht. Der Einfluss des aus dem LMA-Lager austretenden Porenwassers mit hohem pH-Wert auf den benachbarten Opalinuston wird in nachfolgendem Abschnitt 4.8.4 eingehender besprochen.

Die Barrieren schützen und unterstützen einander insbesondere in folgender Weise:

- Das Wirtgestein schützt den Bentonit durch seine geringe Wasserführung und dadurch, dass die chemische Zusammensetzung der Porenwässer dieser beiden Barrieren ähnlich ist.
- Der Bentonit gewährt durch seine Plastizität den Behältern einen Schutz vor extremer mechanischer Belastung, sollte eine tektonische Störzone im Lagerbereich entstehen.
- Der Bentonit und das Wirtgestein schützen die Behälter auch durch die reduzierenden chemischen Bedingungen und den diffusionslimitierten Transport von korrosiven Ionen (z.B. Cl- oder HS-) zum Behälter.
- Die BE- und HAA-Behälter schützen die BE und HAA vor Wasserzutritt und verhindern während der Dauer ihrer Dichtheit jegliche Freisetzung der radioaktiven Inhalte.
- Die BE-Behälter oder die Innenbehälter aus Stahl unterstützen mit ihren Korrosionsprodukten die reduzierenden Bedingungen nahe der Brennstoffoberfläche und verlangsamen so die Auflösung des Brennstoffs.
- Der Bentonit unterstützt die Streckenverfüllungen und Versiegelungen indem er durch seinen Quelldruck zum Wiederverschliessen und –verdichten der Auflockerungszone beiträgt. Dadurch wird die mögliche Freisetzung durch die Auflockerungszone entlang den unterirdischen Bauwerken an Streckenverfüllungen und Versiegelungen vorbei reduziert.

Die Barrieren haben aber auch die nachfolgend angesprochenen nachteiligen Einflüsse aufeinander.

Das unterirdische Bauwerk ist der Grund für die bis einige Meter in den Opalinuston hineinreichende Auflockerungszone, die zerklüftet ist und eine um Grössenordnungen höhere Durchlässigkeit hat als der vom Bauwerk ungestörte Opalinuston. Die Auflockerungszone hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Wirksamkeit des Wirtgesteins als Barriere, da die Transportwege im Wirtgestein 40 m oder länger sind. Hingegen kann, wie oben erwähnt, die Auflockerungszone einen Freisetzungsweg bilden, der die geologische Barriere umgeht. Drei Umstände reduzieren die Bedeutung dieses Freisetzungsweges:

- Bei den Versiegelungsbauwerken beabsichtigt die Nagra, die Auflockerungszone zumindest teilweise zu entfernen, um diesen Freisetzungsweg zu unterbrechen.
- Die Freisetzung durch die Auflockerungszone der HAA/BE-Lagerstollen erfolgt erst nach dem Versagen der Endlagerbehälter durch korrosive Schwächung und Diffusion der Radionuklide durch die Bentonitverfüllung. Diese beiden Vorgänge finden erst nach der Aufsättigung des Nahfeldes statt. Dann herrscht im Nahfeld ein erhöhter Druck, der durch das Quellen des Bentonits, die Konvergenz der Stollenwände, den Gasdruck infolge korrosiver Entstehung von Wasserstoff und möglicherweise als Folge einer Volumenzunahme der Behälter während der Korrosion zustande kommt. Dieser Druck trägt noch vor der möglichen Freisetzung von Radionukliden zur Verdichtung und Verheilung der Auflockerungszone bei. Im LMA-Lager muss die Auflockerungszone hingegen als Freisetzungsweg beachtet werden. Die Nagra hat diesen Pfad auch als möglichen Entlastungsweg für den erhöhten Gasdruck in den Lagertunneln betrachtet.
- Der Freisetzungsweg entlang der unterirdischen Bauwerke ist verhältnismässig lang. Bei den hydraulischen Druckverhältnissen und der geringen Durchlässigkeit des Wirtgesteins ist nicht mit bedeutender Wasserbewegung entlang der Auflockerungszone zu rechnen. Der lange Diffusionsweg führt zu geringen Konzentrationsgradienten.

Die Auflösung des HAA-Glases geschieht mit einer kleinen Rate, die sich bei stagnierendem Si-gesättigten Wasser einstellt. Wird Si von der Glasoberfläche weggeführt, wird es durch rascher laufende Auflösungsprozesse des Glases nachgeliefert. Sowohl der Bentonit wie auch die Korrosionsprodukte des Stahlbehälters können für Si aus HAA eine Senke bilden und dadurch die Auflösungsrate des Glases erhöhen.

Das Porenwasser der Zementverfüllung der LMA-Lagertunnel hat einen hohen pH-Wert. Durch den Kontakt mit diesem Porenwasser finden mineralogische Veränderungen in angrenzenden Bereichen des Opalinustons statt. Nach Berechnungen der Nagra können solche Veränderungen bis etwa 4 m in den Opalinuston hineinreichen, falls im betroffenen Volumen etwa 10 % des Opalinustons verändert wird (Abschnitt 4.8.4). Eine Störung der Porenwasserchemie ist in 10^6 Jahren bis in eine Tiefe von 10 m in den Opalinuston hinein möglich. Das Ausmass der mineralogisch veränderten Zone ist zu klein, um die Barrierenwirkung des Wirtgesteins zu beeinträchtigen. Hingegen ist zu untersuchen, ob die mineralogischen Veränderungen zu einer Abnahme der Porosität des Wirtgesteins im Bereich der Lagertunnel führt, die bedeutsam wäre für den im Lager erreichten Gasdruck und die Art der Gasableitung durch den Opalinuston.

Die Eisenkorrosion in den Lagerstollen für HAA und BE führt zu Gasbildung und erhöhtem Gasdruck im Nahfeld. Das Wasserstoffgas entweicht durch den Bentonit und den

Opalinuston. Die Gasfreisetzungsvorgänge können mit mechanischer Veränderung der Freisetzungspfade verbunden sein (Abschnitte 4.5.3.4 und 4.7.5).

Die von den HAA und den BE abgegebene Wärmeleistung führt zu erhöhter Temperatur im Bentonit und im Opalinuston. Insbesondere im Bentonit entstehen nennenswerte Temperaturgradienten. Die Temperaturgradienten sind kurz nach der Verfüllung der Lagerstollen am stärksten, während die Aufsättigung des Nahfeldes noch nicht abgeschlossen ist. Temperaturgradienten können, insbesondere bei Teilsättigung, zu mineralogischen Veränderungen im Bentonit führen (Abschnitte 4.5.3.1 und 4.5.3.2).

4.8.4 Einfluss des Zementporenwassers auf den Opalinuston

In den mit Zement gefüllten LMA-Lagertunneln herrscht eine für geologische Verhältnisse ungewöhnliche chemische Umgebung. Beim pH-Wert des Zement-Porenwassers, der zwischen 12.5 bis 13.5 liegt, sind einige Bestandteile des Opalinustons nicht stabil. Aus dem Nahfeld ins Fernfeld austretendes Zementwasser bewirkt eine teilweise Auflösung der Schichtsilikate und Quarzminerale des Opalinustons. Der Einflussbereich des austretenden Porenwassers wird als „pH-Fahne“ bezeichnet. In diesem Grenzbereich sind Mineralumwandlungen zu erwarten, die einen Einfluss auf das Migrationsverhalten der Radionuklide haben können.

Angaben der Nagra

Die Nagra hat an der Universität Bern und im Felslabor Mont Terri Untersuchungen zur Wechselwirkungen zwischen Zement und Opalinuston durchführen lassen (Adler 2001, Mäder 2003). Die Resultate dieser Untersuchungen zeigen, dass die Mineralumwandlungen, die durch den Einfluss von Zementwasser im Opalinuston stattfinden, zu einer Verminderung der Porosität führen. Während instabile Bestandteile gelöst werden, bilden sich gleichzeitig sekundäre, unter den vorherrschenden Bedingungen stabile Festphasen. Die Nagra schliesst aus der Studie, dass in der ersten Phase mit einem hohen pH-Wert ($\text{pH} = 13.5$) Dolomit und Kaolinit aufgelöst werden, wobei sich Kalzit, Mg-Silikat/Aluminat-Hydroxid und Illit bilden. Für die zweite Phase der pH-Entwicklung ($\text{pH} = 12.5$, siehe Abschnitt 4.6.4) erwartet die Nagra zusätzlich zu diesen Reaktionen die Bildung von Kalzium-Silikat-Hydrat-(CSH)-Phasen und Zeolithen. Die Porosität nimmt dabei weiter ab, wodurch die Migration der Radionuklide verlangsamt wird. Die Nagra geht zudem davon aus, dass die Sorptionseigenschaften der Umwandlungsminerale ebenso gut sind wie die des intakten Opalinustons, und dass der gegenüber dem Grundwasser des Opalinustons erhöhte pH-Wert das Sorptionsverhalten vieler Radionuklide sogar verbessert.

In welchen Zeiträumen solche Mineralumwandlungen stattfinden können, ist unklar. Um ein Bild der möglichen Auswirkungen der pH-Fahne zu erhalten, schätzt die Nagra die maximale Eindringtiefe des Zementwassers in den Opalinuston ab. Hierzu nimmt sie an, alles im Zementnahfeld theoretisch vorhandene Hydroxid diffundiere in den Opalinuston und bewirke dort die besagten Mineralumwandlungen. Ist die gesamte Matrix des Opalinustons durch die Mineralumwandlungen betroffen, dann ist die Wirkung der pH-Fahne nach 0.5 m Eindringtiefe in den Opalinuston erschöpft. Reagieren nur 10 % des Opalinustons, reicht die pH-Fahne etwa 4 m weit in den Opalinuston hinein, bei 1 % sind es 17 m (Mäder, 2003). Je weiter also die pH-Fahne ins Fernfeld eindringt, desto intakter bleibt der Opalinuston gesamthaft gesehen. Umgekehrt ist der von den Mineralumwandlungen betroffene Bereich

des Fernfelds umso kleiner, je vollständiger die Umwandlungsprozesse ablaufen. Aus diesen Untersuchungen und Abschätzungen folgert die Nagra, dass die Wechselwirkung zwischen Zementwasser und Opalinuston keine nachteiligen Auswirkungen auf die Sicherheit des Tiefenlagers hat.

Beurteilung der HSK

Die Untersuchungen an der Universität Bern und im Felslabor Mont Terri sind aufschlussreich und tragen viel zum Verständnis der Vorgänge im Einflussbereich der pH-Fahne bei. Die Ergebnisse sind plausibel und bestätigen die wichtigsten Voraussagen früherer Modellrechnungen (Steefel und Lichtner, 1994 und 1998). Obwohl die Umwandlungsprodukte erst teilweise im Detail bekannt sind, kann die Auswirkung der pH-Fahne auf die Sicherheit des Tiefenlagers bereits gut abgeschätzt werden.

Es ist einleuchtend, dass sich unter dem Einfluss der pH-Fahne die bei hohen pH-Werten instabilen Bestandteile des Opalinustons in Phasen umwandeln, die unter diesen Bedingungen stabil sind. Die Abnahme der Porosität ist ebenfalls nachvollziehbar, weil die Erhöhung des pH-Wertes und der Kalzium-Konzentration zusätzlich zur Ausfällung von Kalzit und damit zu einer Zunahme des Festkörpervolumens führt. Ob die Sorptionseigenschaften der Umwandlungsphasen ebenso wirksam sind wie die des Opalinustons, lässt sich ohne die genaue Kenntnis ihrer Zusammensetzung nicht ohne weiteres vorhersagen. Die Feststellung der Nagra, dass der erhöhte pH-Wert für die meisten Radionuklide eher zu einer Sorptionszunahme gegenüber dem Opalinuston führt, ist hingegen korrekt.

Die Abschätzungen der Nagra zur maximalen Eindringtiefe der pH-Fahne in den Opalinuston zeigen, dass der von Phasenumwandlungen betroffene Bereich limitiert ist. Die von der pH-Fahne hervorgerufenen Reaktionen haben eine pH-Senkung zur Folge, wodurch sich die Wirkung der pH-Fahne vermindert. Auch wenn sich die Sorptionseigenschaften der Umwandlungsprodukte als schlechter erweisen würden als von der Nagra angenommen, wird der Einfluss der pH-Fahne auf die Rückhaltefähigkeit des Opalinustons von untergeordneter Bedeutung für die Sicherheit des Tiefenlagers sein, womit die Einschätzungen der Nagra von der HSK geteilt werden. Auf die weiter zu untersuchende Bedeutung der Abnahme der Porosität für die Entwicklung des Gasdrucks in den Lagertunneln wurde bereits hingewiesen (Abschnitte 4.7.5 und 4.8.3).

4.8.5 Beurteilung des Mehrfachbarrierensystems

Die in den vorherstehenden Abschnitten genannten Barrieren beruhen zum Teil auf ganz unterschiedliche Wirkungen (chemische Bindung der Radionuklide, Einschluss der Abfälle in dickwandigen Behältern, Unterbinden eines Wasseraustausches, pH-Wert, u.s.w.). Die Barrieren sind gestaffelt und passiv (nicht von Unterhalt und Reparatur abhängig), aber nicht voneinander unabhängig. Dennoch behält das Barrierensystem sehr weitgehend seine Wirkung auch dann, wenn eine einzelne Barriere eine unerwartete Schwächung zeigen würde (frühes Behälterversagen, gestörte Nahfeldchemie, neu entstehende tektonische Störung, u.s.w.). Es liegt somit ein Mehrbarrierensystem in Sinne der Anforderung der Richtlinie HSK-R-21 vor.

Die Wirkung der Barrieren im BE/HAA-Lager ist klar zeitlich geordnet: In der Anfangszeit gewährt der Endlagerbehälter einen Schutz der Abfallmatrizen vor Wasser und gewährleistet einen absoluten Einschluss der Radionuklide. Nach Versagen der Behälter wirken die Ab-

fallmatrizen als sich zeitlich sehr langsam abbauende Barrieren. Gegen die daraus entstehende Freisetzung kommen die nachfolgend angeordneten Barrieren gestaffelt zum tragen. Während der ganzen Zeit nimmt die Menge der Radionuklide durch den radioaktiven Zerfall ab.

Die Figur 6.4-4 vom NTB 02-05 zeigt am Beispiel des HAA im Referenzfall, wo die Radionuklide schliesslich zerfallen. Es zeigt sich, dass die Abfallmatrizen durch ihre lange Lebensdauer und die Bentonitbarriere durch die geringe Durchlässigkeit und die günstigen Sorptionseigenschaften die weitere Ausbreitung der überwiegenden Mehrheit der Radionuklide verhindern. Der Opalinuston, der dank geringer Durchlässigkeit und langem Migrationsweg eine sehr effektive Barriere ist, wird im Referenzfall nur wenig beansprucht. Bei einer Schwächung der Bentonitbarriere würde er aber deren Funktion übernehmen. Die Radionuklide, die in kleinen Mengen bis zur Biosphäre gelangen, sind solche, für die diese drei Barrieren geringe Wirkung haben: Radionuklide der IRF (nicht in der Matrix gebunden), die dank geringer Sorption und langer Halbwertszeit den Bentonit und den Opalinuston durchwandern können. Wie im Abschnitt 4.11 dargelegt wird, sind die radiologischen Folgen dieser restlichen Radionuklide aber weit unterhalb der Schutzziele der Richtlinie HSK-R-21.

4.9 Biosphäre und Expositionspfade

Die Biosphäre ist der letzte Teilbereich, der in der Ausbreitungsberechnung der Radionuklide zu berücksichtigen ist. Die Biosphäre stellt den Lebensraum des Menschen dar, den Boden, aus dem er sein Trinkwasser und seine Nahrung bezieht. Die Biosphäre wird von den geomorphologischen und klimatischen Verhältnissen am Lagerstandort geprägt. Sie stellt keine Barriere dar, sondern bestimmt die Strahlenexposition des Menschen durch die in die Biosphäre freigesetzten Radionuklide. Der Transfer der Radionuklide von ihrem Eintritt in die Biosphäre an bis zum Menschen ist ein komplexer Vorgang, der von einer Vielzahl von Transferfaktoren abhängig ist, die in die Modellierung der Biosphäre einfließen. Der Zeithorizont einer solchen Betrachtung liegt weit in der Zukunft und es ist schwer vorhersagbar, welche geomorphologischen und klimatischen Bedingungen sowie gesellschaftlichen Gegebenheiten und Handlungsmöglichkeiten dann vorhanden sein werden. Während die geomorphologischen und klimatischen Bedingungen durch die Betrachtung unterschiedlicher Szenarien untersucht werden können, lassen sich die zukünftigen menschlichen Lebensweisen kaum vorhersagen. Die Richtlinie HSK-R-21 legt fest, dass für die Ermittlung der Strahlenexposition eine Bevölkerung mit aus heutiger Sicht realistischen Lebensgewohnheiten anzunehmen ist.

Im Folgenden wird zunächst das Biosphärenmodell mit den für den Referenzfall angenommenen Eigenschaften (Referenz-Biosphäre) und anschliessend mehrere Alternativen dazu (alternative Biosphärenmodelle) besprochen.

4.9.1 Die Referenz-Biosphäre

Angaben der Nagra

Das Modell der Biosphäre besteht aus einer Reihe von geometrisch und stofflich definierten Kompartimenten. Diese sind (von unten nach oben) der lokale Aquifer (oberster Teil der Geosphäre, Mächtigkeit 20 m), der Unterboden (Boden zwischen Aquifer und Wurzelhori-

zont, 2 m), der Oberboden (Wurzelhorizont, 0.25 m), das Oberflächenwasser und sein Sedimentbett. Die betrachtete Fläche der Biosphäre beträgt 2.3 km². Die Eigenschaften der Modellkompartimente wurden anhand eines angenommenen Exfiltrationsgebiets im Rheintal unterhalb des Rheinfalls definiert.

Die Berechnungen zum Referenzfall und zu allen Referenzfall-Alternativen erfolgten mit Hilfe des Computercodes TAME (Terrestrial-Aquatic Model of the Environment, NTB 93-04). TAME besteht aus zwei Teilmodellen: Im ersten Teil wird der Transport von Radionukliden in der oberflächennahen Umgebung berechnet. Im zweiten Teil werden die Strahlendosen für eine Einzelperson ermittelt. TAME modelliert in vereinfachter Form den Transfer der Radionuklide in der Biosphäre und ihre Verteilung auf die vorhandene Flora und Fauna. Es wird dann anhand einer Standardernährung ermittelt, wie und in welcher Konzentration diese Radionuklide in den menschlichen Körper gelangen und welche Jahresdosis sie verursachen.

Die klimatische und hydrologische Situation im angenommenen Exfiltrationsgebiet stellt die Basis für die Referenz-Biosphäre dar (NTB 02-05, S. 190). Von 1 m Niederschlag pro Jahr verdunsten ca. 60 % wieder. Regenwasser und Bewässerung mit Wasser aus dem Aquifer (0.5 m/a) garantieren die notwendige Produktion der Nahrungsmittel. Die Erosionsrate des Gebietes orientiert sich an der momentanen Hebungsrate von 0.1 mm a⁻¹ (vgl. Abschnitt 2.5.2), eine Sedimentakkumulation findet nicht statt. Die Wasserflüsse im lokalen Aquifer und im Oberflächenwasser entsprechen den heute in der Region gemessenen Werten (NTB 02-05, S. 87). Die Bewässerung aus lokalen Brunnen verursacht einen kontinuierlichen Eintrag der aus der Geosphäre stammenden Radionuklide in die landwirtschaftlichen Produkte und damit in die Nahrungskette.

Die Landwirtschaft und die darin wirksamen Prozesse orientieren sich an der heutigen Situation einer interglazialen Klimaperiode. Die Ernährung der Bevölkerung besteht aus Gemüse, Korn, Früchten, Milch und Milchprodukten, Fleisch, Fisch, Eiern und Wasser (NTB 02-05, S. 119). Abweichend von der heutigen Praxis wird jedoch vorsichtigerweise angenommen, dass sich die Menschen ausschliesslich von der eigenen Scholle ernähren.

Die Nagra hat ihre TAME-Berechnungen mit Hilfe eines vereinfachten Modell-Ansatzes nachrechnen lassen (Gribi 2004). Diese Studie verwendet den gleichen Datensatz wie die Nagra (NTB 02-06) und kommt mit den Vereinfachungen zu durchwegs vergleichbaren Resultaten. Sowohl in den Berechnungen zum Referenzfall mit TAME als auch der analytischen Lösung in Gribi (2004) bleiben die von der Nagra ermittelten Dosiswerte mindestens drei Grössenordnungen unterhalb des Schutzziels von 0.1 mSv/a gemäss Richtlinie HSK-R-21.

Beurteilung der HSK

Die HSK hat die vorgelegte Biosphärenmodellierung nur grob geprüft. Die mit dem Biosphärenmodell berechneten Jahresdosiswerte aus dem Referenzfall werden in Abschnitt 4.11 beurteilt. Die Betrachtung des Radionuklideintrags in die Biosphäre, der Aufnahme der Radionuklide in die Nahrungskette und der resultierenden Dosis für eine Bevölkerung mit heutigen Gewohnheiten muss zwei grundlegende Probleme berücksichtigen:

- In NEA (2004b, Box 1) wird darauf hingewiesen, dass Aussagen über die oberflächennahen Prozesse kaum über 1000 Jahre hinaus vorhersagbar sind. Da die maximalen Dosen durch die am schnellsten transportierten und am wenigsten sorbierenden

Radionuklide (^{129}I , ^{79}Se , ^{36}Cl und ^{14}C , siehe NTB 02-05, Fig. 6.5-1) im Referenzszenarium erst nach 10^4 bis 10^6 Jahren auftreten, sind Vorhersagen über die Prozesse in der Biosphäre im Allgemeinen stark spekulativ. Die Nagra wählt hier eine modellhafte konservative Betrachtungsweise mit der Annahme einer sich konstant im Endlagergebiet aufhaltenden und aus der eigenen Scholle ernährenden Bevölkerung mit den heutigen Lebensgewohnheiten. Die Angaben für den Transfer der Radionuklide durch die verschiedenen Teile der Biosphäre ergeben sich unter Annahme klimatischer Bedingungen, wie sie heute an der Oberfläche oberhalb des Tiefenlagers herrschen. Diese Festlegungen sind im Einklang mit der Richtlinie HSK-R-21. Die HSK ist deshalb mit dem gewählten Vorgehen einverstanden. Die von der Nagra verwendeten Ansätze zur Modellierung sind eng verknüpft mit vergleichbaren Ansätzen und Erfahrungen aus anderen Ländern (z.B. Jones et al. 2004).

- Trotz starker Vereinfachungen müssen für diese Art von Modellierungen eine grosse Anzahl von FEPs (features, events and processes) verstanden und mathematisch umgesetzt werden. Das hat zur Folge, dass das Resultat der Modellierung von einer grossen Menge von Parametern abhängt. Die vorhandene Genauigkeit dieser Modellparameter ist sehr unterschiedlich. Die Nagra hat sich dabei weitgehend an publizierte Daten gehalten, sofern diese erhältlich sind. Die HSK hat eine grössere Anzahl dieser Parameter stichprobenartig geprüft und kommt dabei zum Ergebnis, dass die Parameter des Referenzfalles vernünftig und im Einklang mit internationalen Datenbanken bzw. Ansätzen sind.

Die HSK hat die Transferfaktoren der verschiedenen Nuklide für die Aufnahme in einzelne Nahrungsmittel mit denjenigen einer kürzlich veröffentlichten Studie (Jones et al. 2004) verglichen. Auch wenn die Werte im Allgemeinen nicht übereinstimmen, zeigt sich zwischen den beiden Sätzen von Transferfaktoren deutlich eine lineare Korrelation. Beim Vergleich der für Milch, Fleisch und Süsswasserfisch tabellierten Transferfaktoren liegen die vom Trend abweichenden Nuklide entweder auf der konservativen Seite (höhere Transferfaktoren in TAME) oder sie sind in der Biosphärenmodellierung von geringer Bedeutung, da sie kurze Halbwertszeiten oder nur eine geringe Freisetzung in die Biosphäre aufweisen. Erwähnenswert ist der Transferfaktor für ^{129}I bei Fleisch, für den die Nagra einen um eine Grössenordnung tieferen Wert als Jones et al. (2004) annimmt. Bei Fisch liegt der Transferfaktor für ^{93}Mo bei der Nagra um ca. 4 Grössenordnungen unterhalb des aufgrund der sonst guten Korrelation zu erwartenden Wertes. Gemäss Nachfrage der HSK bei der Nagra handelt es sich hier um einen fehlerhaften Wert. Die Ergebnisse der Dosisberechnungen sind aber auf den Wert dieses Transferfaktors unempfindlich. Eine Nachberechnung der Nagra mit dem korrigierten Wert führte zu einer Erhöhung der Dosis im Referenzfall um weniger als 1 %.

Zusammenfassend hält die HSK fest, dass sie mit der Biosphärenmodellierung der Nagra auf der Basis von TAME einverstanden ist und dass die Anwendung des Modells im Referenzfall mit den Vorgaben der Richtlinie HSK-R-21 in Übereinstimmung ist.

4.9.2 Alternative Biosphärenmodelle

Angaben der Nagra

Als Teil der Sicherheitsanalyse hat die Nagra ausgehend vom Referenzfall eine Gruppe von abweichenden Szenarien betrachtet, bei denen vom Referenzfall nur in den Parametern der

Biosphäre abgewichen wird (NTB 02-05, Tab. 7.10-1). Diese gerechneten Szenarien lassen sich grob in zwei Gruppen unterteilen. Die Szenarien der ersten Gruppe decken verschiedene Lebensräume in der Referenzbiosphäre ab:

- Im Tal gelegener Sedimentationsraum: Er zeichnet sich aus durch erhöhte Sedimentationsrate wegen häufigen Überflutungen, hohe Erosionsrate und reduzierte Bewässerung. Dieser Fall führt zu einem reduzierten Nuklidtransfer.
- Landschaft mit starker Versumpfung: Diese ist gekennzeichnet durch intensiven Wasserfluss und Böden reich an Organika. Das Szenarium führt zu einem erhöhten Nuklidtransfer.
- Lebensraum mit einer aus dem Malm-Aquifer gespiesenen Trinkwasserquelle: Es wird angenommen, dass 100 % der transferierten Radionuklide aus Trinkwasser stammen. Dieser Fall führt zu Dosen im Bereich des Referenzfalles.

Mit den Szenarien der zweiten Gruppe werden verschiedenen Klimata betrachtet:

- Trocken-warmes Klima: Das ist vergleichbar mit der heutigen Situation im Zentralwallis und ist gekennzeichnet durch eine gegenüber dem heutigen Klima halbierte Niederschlagsmenge und eine intensive Bewässerung. Bei diesem Klima wird ein um eine Grössenordnung erhöhter Nuklidtransfer im Vergleich zum Referenzfall errechnet.
- Nasswarmes Klima: Dieses Klima ist vergleichbar mit der heutigen Situation im Südtessin und ist gekennzeichnet durch eine Verdoppelung der Niederschlagsmenge (gegenüber dem heutigen Klima im Zürcher Weinland), eine höhere Evapotranspiration und eine reduzierte Bewässerung. Bei diesem Klima werden um einen Faktor 3 reduzierte Dosiswerte für die Bevölkerung ermittelt.
- Periglaziales Klima: Das entspricht den heutigen Tundra-Gebieten in Nordskandinavien und ist gekennzeichnet durch eine veränderte Ernährung, die teilweise Nahrungsmittel mit erhöhter Aktivitätsakkumulation einschliesst. Der Nuklidtransfer ist wegen dem Permafrostboden eingeschränkt. Eine vereinfachte Betrachtung führt auf Dosiswerte, die jene des Referenzfalls nicht übersteigen.

Beurteilung der HSK

Die Berechnungen mit TAME zu diesen Alternativszenarien ergeben Dosiswerte, die mindestens zwei Grössenordnungen unterhalb des behördlichen Schutzziels von 0.1 mSv/a der Richtlinie HSK-R-21 liegen. Dabei werden in vier Fällen nur einzelne Parameter der oberflächennahen Umgebung variiert. In einem Fall (Biosphäre mit Trinkwasserbrunnen im Malm) werden auch die Prozesse zwischen Umgebung und Bevölkerung, d.h. die Ernährung variiert; in einem weiteren Fall (Biosphäre mit periglazialen Klima) wird TAME nicht angewendet. Während die Szenarien mit Sedimentation und Sumpfland die heutige lokal-geomorphologische Variation umfassen, entsprechen die Alternativen mit einem trocken- und feuchtwarmem Klima der heute vorhandenen Variation der Tiefland-Klimata in der Schweiz. Der Biosphären-Fall mit einer aus dem Malm-Aquifer gespiesenen Quelle evaluiert die Möglichkeit eines direkten Übertritts der Radionuklide aus der Geosphäre zum Menschen. Das Szenario mit periglazialen Klima zieht die in den letzten 10^4 - 10^6 Jahren nachgewiesene Alternierung zwischen Eis- und Zwischeneiszeiten in Betracht (NTB 99-08), indem das heutige Zwischeneiszeitklima durch ein Eiszeitklima ersetzt wird.

Die HSK ist mit der Auslotung der geomorphologischen und klimatischen Einflüsse auf den Nuklidtransfer in der Biosphäre einverstanden. Die Variation einzelner Parameter ist jedoch aus Sicht der HSK nicht immer nachvollziehbar. Es wird beispielsweise festgestellt, dass in einem Klima mit doppelter oder halbierten Niederschlagsmenge keine Auswirkung auf die Erosion angenommen wurde, oder dass die erhöhte Porosität im Oberboden des Sumpflandes nicht mit einer reduzierten Verwundenheit (Tortuosität) der Fliesswege in dieser Schicht verbunden wurde. Für solche Szenarien bliebe abzuklären, ob die Nichtberücksichtigung dieser Nebenerscheinungen tatsächlich eine konservative Annahme darstellt.

Als einen der wichtigsten Parameter in der Biosphärenmodellierung sieht die HSK die Verdünnung der Radionuklide in den Aquiferen und lokalen Oberflächengewässern an. Bei einer Weiterführung des Projektes sollte der Bestimmung dieses Parameters mehr Gewicht gegeben werden.

4.10 Szenarienanalyse

4.10.1 Hinweise zur Szenarienanalyse

Die wissenschaftlichen Kenntnisse über die Art und die Eigenschaften der Bestandteile des Tiefenlagersystems sowie die mögliche Beeinflussung dieser Bestandteile durch externe Prozesse und Ereignisse erlauben die Charakterisierung der mutmasslichen zukünftigen Entwicklung des Tiefenlagersystems (siehe auch Abschnitt 4.3). Diese Kenntnisse können aber nie vollständig sein. Insbesondere kann die zeitliche Entwicklung über lange Zeiträume hinweg durch Ereignisse und Entwicklungen beeinflusst werden, die heute nur ungenau verstanden sind. Die Beschreibung der zukünftigen Entwicklung des Systems ist deshalb mit Ungewissheiten verbunden. Wenn die Ungewissheiten statistisch erfassbar sind oder zumindest in ihrem möglichen Ausmass eingegrenzt werden können, ist es grundsätzlich möglich und sinnvoll, ihren Beitrag zur Ungewissheit der für die erwartete zeitliche Entwicklung errechneten maximalen Strahlenexposition rechnerisch zu bestimmen.

Wenn die Ungewissheiten nicht leicht quantifizierbar sind, benützt die Sicherheitsanalyse eine andere Technik. Es werden beispielhafte Szenarien, das heisst mögliche Situationen und Entwicklungen, betrachtet, welche den Bereich der Möglichkeiten abstecken. Die Szenarien werden nach besten Kenntnissen so gewählt, dass angenommen werden kann, dass die Strahlenexposition, die bei der realen zukünftigen Entwicklung auftreten wird, durch die errechnete Strahlenexposition mindestens eines dieser Szenarien übertroffen wird. Sind die radiologischen Auswirkungen dieser Szenarien mit den Schutzziele verträglich, so kann davon ausgegangen werden, dass gleiches für die reale aber unbekannte zukünftige Entwicklung gilt.

Die traditionelle methodische Beschreibung der Szenarienanalyse geht davon aus, dass alle für die Sicherheit des Tiefenlagers relevanten FEPs (Features, Events and Processes, siehe Abschnitt 4.3) zunächst erkannt und untersucht werden. Durch Zusammenstellen der FEPs zu möglichen zeitliche Abläufen werden dann die Szenarien gebildet, aus denen solche ausgewählt werden, welche die gesuchte Abdeckung der möglichen realen Entwicklungen bilden.

Die praktische Ausführung der Szenarienanalyse muss nicht dieser „bottom-up“-Reihenfolge folgen. Es ist möglich, dass bereits der Überblick über die wichtigsten wissenschaftlichen Erkenntnisse zum System und die Erfahrung aus anderen Sicherheitsanalysen für Tiefenlager von Vorneherein in groben Zügen erkennen lassen, welches die wichtigsten Szenarien sein werden. Diese werden dann detaillierter untersucht, woraus sich eine weitere Aufteilung ergeben kann („top-down“-Reihenfolge).

So wie die „bottom-up“-Reihenfolge dazu führen kann, dass „der Wald vor lauter Bäumen nicht gesehen wird“, birgt die „top-down“-Reihenfolge die Gefahr einer Vor-eingenommenheit, bei der wichtige Unterschiede des aktuellen Tiefenlagersystems zu den bereits vertrauten Systemen übersehen werden.

Die Nagra beschreibt in NTB 02-05 das von ihr gewählte Vorgehen, das beide Nachteile zu überwinden versucht: Ein „top-down“-Verfahren, das anhand einer nach dem umgekehrten Prinzip gebildeten FEP-Datensammlung auf Lücken geprüft wird.

Nachfolgend wird zuerst kurz auf die FEP-Datensammlung eingegangen. Anschliessend wird der Weg, der von der wissenschaftlichen Beschreibung des Tiefenlagersystems bis zu den ausgewählten Szenarien geführt hat, kommentiert.

4.10.2 FEP-Analyse

Angaben der Nagra

Die FEPs, ihre Herleitung sowie ihre Verwendung im Projekt Opalinuston werden in NTB 02-23 beschrieben. Ein FEP wird, wie der Name angibt, durch die Angabe eines einzelnen Phänomens, Ereignisses oder Prozesses festgelegt, wobei zur Benennung auch eine grobe Charakterisierung gehört. Bei der Abgrenzung der FEPs besteht manchmal Flexibilität, die in Kenntnis des zu beschreibenden Systems, der Methodik der Sicherheitsanalyse und der verfügbaren Untersuchungsmittel zweckmässig genutzt werden kann.

Die FEP-Datensammlung für das vorgelegte Projekt Opalinuston wurde folgendermassen erarbeitet: Zuerst übertrug die Nagra die FEPs ihrer bisherigen Projekte (insbesondere Kristallin-I, NTB 93-13) auf die Situation im vorliegenden Projekt und ergänzte sie aufgrund ihrer Kenntnisse des aktuellen Lagerkonzepts. Sie legte auch die Randbedingungen fest, die aus dem Lagerkonzept und aus den behördlichen Anforderungen abgeleitet werden können. Die so entstandene Liste von FEPs wurde mit der internationalen FEP-Liste der NEA (NEA 2000) verglichen und auf Vollständigkeit geprüft. Dabei wurden FEPs ausgeschieden, die entweder ohne Bedeutung für das vorliegende System sind oder ausserhalb des Rahmens stehen, der durch die Randbedingungen gegeben ist (wie z.B. die Evolution der menschlichen Spezies). Ebenfalls wurde ein Vergleich mit der internationalen FEPCAT-Datensammlung (NEA 2003) gemacht, einer FEP-Datensammlung, die sich speziell mit Eigenschaften von Tongestein und der Lagerung im Tongestein befasst. Die detaillierten Ergebnisse beider Vergleiche sind in Tabellen in NTB 02-23 aufgeführt. Die so entstandene OPA-FEP-Datenbank enthält 482 FEPs. In einem weiteren Schritt wurden FEPs ausgeschieden, die aufgrund des wissenschaftlichen Verständnisses des Lagersystems eine geringe Sicherheitsrelevanz haben. Die Gründe für ihr Ausscheiden wurden festgehalten. Die verbleibende Liste der sicherheitsrelevanten OPA-FEPs enthält 447 FEPs. Die Nagra äussert ihre Überzeugung, dass die Vollständigkeit ihrer FEP-Liste nach diesen Abgleichen ausreichend gesichert sei.

Im Projekt Opalinuston wird die FEP-Liste nicht zur Konstruktion sondern zur Überprüfung der angenommenen Szenarien verwendet. Eine erste solche Überprüfung geht der Frage nach, ob die sicherheitsrelevanten OPA-FEPs eine Entsprechung in den aus wissenschaftlicher Sicht identifizierten „wichtigsten sicherheitsrelevanten Phänomenen“ (siehe Abschnitt 4.10.3) finden. Weiter werden die so genannten Super-FEPs (siehe Abschnitt 4.10.3) und die rechnerisch zu untersuchenden Szenarien in gleicher Weise geprüft. Die Ergebnisse dieser Überprüfung werden in NTB 02-23 (Tab. A6.1.1) festgehalten.

Beurteilung der HSK

Die Hauptfragen zu den FEPs sind jene der Vollständigkeit und der angemessenen Berücksichtigung in der Sicherheitsanalyse. Letzteres ist auch zu verstehen als die Frage, ob die Prozesse, die mit den FEPs verbunden sind, richtig verstanden und ihre Folgen für das Tiefenlagersystem bekannt sind.

Die Frage der Vollständigkeit wird ausführlich in der Dokumentation der Nagra behandelt. Der kritische Vergleich mit internationalen FEP-Datensammlungen ist eine nützliche Absicherung und wird von der HSK begrüsst. Sie darf aber nicht überbewertet werden. Die internationale FEP-Liste enthält 134 FEPs in der Form sehr allgemeiner thematischer Bezeichnungen, ohne konkrete dazu gehörige Eigenschaften oder Prozesse zu nennen (beispielsweise NEA FEP 2.1.09 “Biological/biochemical processes and conditions in wastes and engineered barrier system“). Als Ergebnis eines Vergleichs der OPA-FEP-Datensammlung mit der internationalen FEP-Liste kann sich als positives Ergebnis nur die Information ergeben, dass es FEPs der OPA-FEP-Datensammlung gibt, die unter eine dieser allgemeinen thematischen Überschriften fällt. Ob es dazu noch weitere FEPs gibt, die unter dieselbe Überschrift fallen würden, aber in der OPA-FEP-Datensammlung fehlen, kann hingegen nicht erkannt werden.

Fast jedes Tiefenlagerprojekt weist Eigenheiten auf, die in anderen Projekten nicht, oder weniger ausgeprägt, vorhanden sind. Im Projekt Opalinuston sind Beispiele hierfür die hohe Nahfeldtemperatur sowie der hohe Druck im Nahfeld, der eine Folge der durchaus erwünschten geringen Durchlässigkeit des Wirtgesteins und der anaeroben Korrosion von Eisen im Nahfeld ist. Es darf nicht davon ausgegangen werden, dass jeder FEP, der im vorliegenden Projekt sicherheitsrelevant ist, auch in anderen Projekten als solcher vorhanden sein müsste. Zum Erkennen der wichtigen FEPs bleibt deshalb als wichtigste Instanz die Einsicht und kritische Prüfung durch die direkt mit dem Gegenstand des Projekts beschäftigten Wissenschaftler. Die Rolle dieser Fachkräfte bei der Entstehung der OPA-FEP-Datensammlung geht auch klar aus der Dokumentation hervor. Die HSK hat ihrerseits keine Lücken in der OPA-FEP-Datensammlung festgestellt.

Die Frage der angemessenen Berücksichtigung der FEPs bei der Szenarienentwicklung wird durch die oben erwähnten Prüfschritte soweit beantwortet, als gezeigt wird, dass die FEPs bei der Szenarienbildung berücksichtigt werden. Ob ihre Wirkungsweise (das heisst: die damit verbundenen Prozesse) richtig gesehen wird, kann daraus nicht ersehen werden, da die Charakterisierung der FEPs in der FEP-Datensammlung im grob Konzeptuellen bleibt. Näheres zu der angenommenen Wirkungsweise kann erst anhand der allgemeinen Systembeschreibung (NTB 02-05) und den konkreten Annahmen für die Rechenfälle (NTB 02-05 und NTB 02-06) erfahren werden. Diese Feststellung möchte die HSK nicht als Kritik verstanden wissen, sondern als Hinweis darauf, dass sie dem korrekten Systemverständnis im Sinne der

Naturwissenschaften ein grosses Gewicht beim Sicherheitsnachweis beimisst. Die FEPCAT-Datensammlung (59 FEPs für Tongesteine) kommt dieser Gewichtung einen Schritt entgegen, indem sie zu jedem FEP auch eine kurze Übersicht über den Stand der Kenntnisse darüber und über die experimentellen Grundlagen dieser Kenntnisse enthält. Der Nachteil, der bei einer solchen Datensammlung in Kauf genommen wird, ist, dass ihr naturwissenschaftlicher Inhalt weniger lange dem aktuellen Stand entspricht, als beispielsweise der Inhalt der im allgemein Begrifflichen verbleibenden internationale FEP-Datensammlung.

4.10.3 Festlegung der Szenarien

Angaben der Nagra

Aus dem Überblick über das wissenschaftliche Verständnis des Tiefenlagersystems (NTB 02-05, Kap. 4 und 5) ergibt sich, welche Eigenschaften und Prozesse für die Langzeitsicherheit wichtig sind. Die Nagra erfasst diese in einer Tabelle der 55 „wichtigsten sicherheitsrelevanten Phänomene“ („key safety relevant features and phenomena“) (NTB 02-05, Tab. 5.7-1). In dieser Tabelle wird

- jedes dieser Phänomene bezeichnet (z.B. „Bentonit: Migration von Radionukliden“),
- die erwartete zeitliche Entwicklung beschrieben (z.B. „Ausschliesslich Diffusion, gute Sorption, chemische Stabilität“),
- bedeutende Ungewissheiten und mögliche Abweichungen von der erwarteten Entwicklung angegeben (z.B. „Ungewissheit bezüglich der Diffusionsvorgänge und der Sorption im Bentonit“).

Aus dem wissenschaftlichen Verständnis ergibt sich auch die Charakterisierung der erwarteten zeitlichen Entwicklung des Tiefenlagersystems. Die Nagra legt einen entsprechenden Referenzfall fest und untersucht in NTB 02-05 (Kap. 6) die Rückhaltefähigkeit des Tiefenlagersystems für die Radionuklide. Sie untersucht auch die Empfindlichkeit der Ergebnisse auf Annahmen und Parameter des Referenzfalls, die mit Ungewissheiten verbunden sind. Aufgrund dieser Überlegungen wählt sie die weiteren, vom Referenzfall abweichenden Entwicklungen, die in zusätzlichen Rechenfällen auf die Rückhaltung oder Freisetzung der Radionuklide untersucht werden (NTB 02-05, Kap. 7).

Die Tabelle der wichtigsten sicherheitsrelevanten Phänomene wird durch die Definition von 38 „Super-FEPs“ teils differenziert, teils zusammengefasst an die Struktur der FEP-Datensammlung angepasst. Jeder Super-FEP bezeichnet ein Phänomen, das mit einem oder mehreren FEPs der OPA-FEP-Datensammlung in Beziehung steht (NTB 02-23 enthält eine tabellarische Zuordnung). Zu jedem Super-FEP bezeichnet die Nagra auch eine oder mehrere dazugehörige Ungewissheiten und gibt an, mit welchen Rechenfällen sie den Einfluss dieser Ungewissheiten untersucht.

Die Nagra definiert zahlreiche Rechenfälle, die zunächst nach ihrer grundsätzlichen Bedeutung in vier Gruppen grob eingeteilt werden (NTB 02-05, Kap. 3.7):

- Fälle, mit denen Ungewissheiten abgedeckt werden, deren Ausmass auf wissenschaftlicher Grundlage eingeschränkt werden kann,
- „Was wäre wenn“-Fälle („what if?“ cases),
- alternative Optionen für die Auslegung des Systems,

- alternative Annahmen zur Illustrierung von Varianten der Biosphäreneigenschaften.

Die Rechenfälle werden ebenfalls danach eingeteilt, ob sie sich in den grundsätzlichen Freisetzungsvorgängen unterscheiden („alternative Szenarien“), in den konzeptuellen Annahmen zur Wirkungsweise der Prozesse (bzw. FEPs) („alternative Konzeptualisierungen“) oder durch die Intensität einzelner Effekte („Parametervariationen“) (siehe auch Abschnitt 4.3). Dadurch ergibt sich eine Aufteilung der ersten der oben genannten Gruppen in die Szenarien:

- Referenzszenarium (Freisetzung von im Wasser gelösten Radionukliden),
- alternatives Szenarium 1 (Freisetzung von flüchtigen Radionukliden in einer Gasphase),
- alternatives Szenarium 2 (Freisetzung von Radionukliden durch menschliche Handlungen).

Die restlichen drei Gruppen werden als je ein Szenarium angesehen.

Das Referenzszenarium entspricht der erwarteten Entwicklung. Der Referenzfall (Referenzszenarium mit Referenzkonzeptualisierung und Referenzparametersatz) enthält auch konservative Vereinfachungen und Parameterwerte sowie spezielle Festlegungen (z.B. wie die menschliche Gesellschaft zu berücksichtigen ist).

Der Referenzfall wird durch die folgenden Festlegungen definiert:

- Die tiefe Lage des Lagerbauwerkes, welche die Isolation der Abfälle gegenüber der Erdoberfläche bewirkt, bleibt für mehrere Millionen von Jahren erhalten.
- Die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins bleiben über mehrere Millionen von Jahren erhalten. Sie werden weder durch Einflüsse (z.B. Gas) aus dem Lager, noch durch geologische und klimatische Ereignisse oder zukünftige menschliche Handlungen signifikant verändert. Die geringe hydraulische Durchlässigkeit und kleinporöse Struktur des Wirtgesteins, sowie die Verfüllung und Versiegelung der Zugangsrampe und des Schachts, haben zur Folge, dass die Migration der Radionuklide im Nahfeld und durch das Wirtgestein überwiegend durch Diffusion im Porenwasser stattfindet. Die versiegelten Zugänge (Zugangsrampe und Schacht) sind zu keiner Zeit wesentliche Freisetzungspfade.
- Die günstige chemische Umgebung, welche zu einer Reihe von Retardierungseffekten führt, bleibt für mehrere Millionen von Jahren bestehen.
- Die Bentonitverfüllung in den BE/HAA-Lagerstollen, die eine Übergangszone zwischen Behälter und Wirtgestein bildet und ähnliche Eigenschaften wie das Wirtgestein hat, behält seine günstigen Eigenschaften während mehrerer Millionen von Jahren.
- Die Abfallmatrizen der HAA und BE halten die meisten Radionuklide auch nach Versagen der Behälter zurück. Den Abfallmatrizen der LMA-Abfälle wird keine Rückhaltewirkung zugesprochen.
- Die HAA- und BE-Behälter schliessen die Abfälle während einer anfänglichen Zeitperiode von 10'000 Jahren vollständig ein (auch wenn Herstellungsdefekte der Behälter nicht ausgeschlossen werden). Im LMA-Lager wird mit dem Beginn der Freisetzung 100 Jahre nach Abschluss der Einlagerung gerechnet. In allen Lagerbereichen (auch LMA) wird angenommen, dass das Lager und seine Umgebung aufgesättigt und das Poren-

wasser in chemischem Gleichgewicht ist zur Zeit, wenn das Wasser in Kontakt mit den Abfällen kommt.

- Die Radionuklide, die aus dem Wirtgestein austreten, migrieren weiter durch die oberhalb und unterhalb ans Wirtgestein angrenzenden Sedimente und werden in regionalen Aquiferen sowie an der Erdoberfläche verdünnt.

Die Referenzkonzeptualisierung wird im NTB 02-05 (Kap. 6.3) durch 43 Festlegungen definiert. Die wichtigsten Referenzparameterwerte werden ebenfalls in NTB 02-05 angeführt (Kap. 7.4.2). Detailliertere Angaben zu den Parametern werden im Zusammenhang mit der Beschreibung der Rechenmodelle im NTB 02-06 gemacht.

Insgesamt legt die Nagra 79 Rechenfälle fest, die für die radiologischen Auswirkungen bei den möglichen Varianten der zukünftigen Entwicklung abdeckend sein sollen. Die Rechenfälle sind in der Tabelle 4.10-1 aufgeführt.

Tabelle 4.10-1: Rechenfälle der Nagra (NTB 02-05, Tab. 6.8-2)

Szenarien	Konzeptualisierungen	Variation von Parameterwerten
1. Referenzszenarium Freisetzung von im Wasser gelösten Radionukliden	1.1 Referenzkonzeptualisierung	1.1a Referenzfall
		1.1b Variables Behälterinventar
		1.1c Reduzierte Behälterlebensdauer
		1.1d Pessimistischer geochemischer Datensatz für das Nahfeld
		1.1e Erhöhte Glasauflösungsrate (HAA)
		1.1f 10-fache Erhöhung der Wasserflussrate in der Geosphäre
		1.1g 10-fache Reduktion der Wasserflussrate in der Geosphäre
		1.1h Pessimistische Sorptionskoeffizienten in der Geosphäre
		1.1i Pessimistischer geochemischer Nahfeld- und Geosphären-Datensatz
		1.1j Pessimistische Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre
		1.1k Pessimistische Annahmen zum ^{14}C (organisch) bei BE
	1.2 Löslichkeitslimitierte Auflösung des abgebrannten Brennstoffs	1.2a Nur Basisfall
	1.3 Thermisch bedingte Veränderungen vom Bentonit	1.3a Nur Basisfall

Szenarien	Konzeptualisierungen	Variation von Parameterwerten
	1.4 Glazial bedingter Wasserfluss im Opalinuston	1.4a Nur Basisfall
	1.5 Zusätzliche Barrierenwirkung durch die Rahmengesteine	1.5a Vertikaler Transport durch die Rahmengesteine
		1.5b Horizontaler Transport in lokalen Aquiferen
	1.6 Radionuklidfreisetzung auch durch Schacht und Zugangsrampe	1.6a Basisfall
		1.6b 100-fach erhöhte hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone
	1.7 Konvergenzbedingte Freisetzung auch durch Zugangsrampe (LMA)	1.7a Stationärer hydraulischer Zustand
		1.7b Wasserpuls
	1.8 Gasinduzierte Freisetzung von Radionukliden auch entlang Schacht und Zugangsrampe	1.8a Basisfall
		1.8b Erhöhte Wasserflussrate im LMA-Lager
2. Alternatives Szenarium 1 Freisetzung von flüchtigen Radionukliden mit der Gasphase	2.1 Freisetzung von ^{14}C aus BE und LMA als flüchtiger Anteil mit der Gasphase nicht durch Schacht und Zugangsrampe	2.1 a-c Drei verschiedene Werte der Gaspermeabilität
	2.2 Freisetzung von ^{14}C aus BE und LMA als flüchtiger Anteil mit der Gasphase auch durch Schacht und Zugangsrampe	2.2 a-c Drei verschiedene Werte der Gaspermeabilität
3. Alternatives Szenarium 2 Freisetzung von Radionukliden durch menschliche Handlungen	3.1 Abteufen eines Bohrlochs ins Tiefenlager	3.1 a-d Abteufen des Bohrlochs in einen BE/HAA/LMA- Lagerstollen (mit Parametervariationen der Wasserflussrate durch das Bohrloch und Variation der Anzahl der betroffenen Behälter)
		3.1 e-g Direktes Treffen eines BE-Behälters (mit Parametervariationen der Wasserflussrate durch das Bohrloch)
	3.2 Grundwasserentnahme aus dem Malmaquifer	3.2a/b Zwei verschiedene Werte (10 %, 100 %) der Erfassung der Kontaminationsfahne
	3.3 Aufgabe des Endlagerbetriebs	3.3a Nur Basisfall
4. „Was wäre wenn“- Fälle Untersuchung der Robustheit des Tiefenlagersystems	4.1 Hohe Wasserflussrate	4.1a 100-fache Erhöhung der Wasserflussrate in der Geosphäre
	4.2 Transport entlang durchlässiger Diskontinuitäten	4.2 a/b Unterschiedliche Anzahl der betroffenen BE/HAA-Behälter (Transmissivität $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)
		4.2c LMA (Transmissivität $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)
		4.2d/e Unterschiedliche Anzahl der betroffenen BE/HAA-Behälter (Transmissivität $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)

Szenarien	Konzeptualisierungen	Variation von Parameterwerten
		4.2f LMA (Transmissivität $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)
	4.3 BE: Erhöhte Auflösungsrate des Brennstoffs	4.3a 10-fache Erhöhung der Auflösungsrate
		4.3b 100-fache Erhöhung der Auflösungsrate
	4.4 Redox-Front (BE/LMA)	4.4a Nur Basisfall
	4.5 LMA: Gasinduzierte Freisetzung von gelösten Radionukliden nur durch die Zugangsrampe	4.5a/b Zwei verschiedene Werte der Wasserflussrate
	4.6 Nicht-retardierte Migration von ^{14}C in flüchtiger Form durch das Wirtgestein. Retardierung in den Rahmengesteinen.	4.6a-c Drei verschiedene Werte der Gaspermeabilität
	4.7 Schwache Nahfeldbarriere und pessimistischer geochemischer Datensatz für Nahfeld und Geosphäre	4.7a Wasserflussrate des Referenzfalls
		4.7b 10-fache Erhöhung der Wasserflussrate
		4.7c 100-fache Erhöhung der Wasserflussrate
	4.8 Keine Advektion (nur Diffusion) in der Geosphäre	4.8a Nur Basisfall
	4.9 Erhöhte Korrosionsrate der Brennelementhüllen	4.9a 10-fache Erhöhung der Korrosionsrate gegenüber dem Referenzfall
	4.10 $K_d(l) = 0$ im Nahfeld und in der Geosphäre	4.10a Nur Basisfall
	4.11 Reduzierte Migrationslänge (30 m) im Wirtgestein	4.11a Nur Basisfall
5. Auslegungsvarianten des Tiefenlagers	5.1 Erhöhtes Abfallinventar (300 GWa)	5.1a Nur Basisfall
	5.2 LMA: Variante mit hochdruckverpressten Abfällen	5.2a Nur Basisfall
	5.3 BE: Behälter mit einer äusseren Kupferhülle	5.3a Behälterversagen nach 10^5 Jahren
		5.3b Vorbebestehender Defekt (kleines Loch in der Behälterwand, vollständiges Versagen nach 10^5 Jahren)
		5.3c Vorbestehender Defekt (grosses Loch in der Behälterwand, vollständiges Versagen nach 10^5 Jahren)
6. Folgen der Ungewissheiten bezüglich der Biosphäre	6.1 Referenz- und alternative Geomorphologie	6.1a Referenzgebiet
		6.1b Sedimentationsgebiet
		6.1c Sumpfgbiet

Szenarien	Konzeptualisierungen	Variation von Parameterwerten
	6.2 Referenzklima und alternative Klimata	6.1d Exfiltration in Trinkwasserquelle
		6.2a Gegenwärtiges Klima
		6.2b Trocken-warmes Klima
		6.2c Feucht-warmes Klima
		6.2d Periglaziales Klima

Beurteilung der HSK

Vorgehen

Es wurde im Abschnitt 4.10.1 erwähnt, dass bei der traditionellen Beschreibung des Vorgehens zur Herleitung von Szenarien die FEP-Datensammlung als Ausgangspunkt dient. Es darf aber vermutet werden, dass in den meisten Lagerprojekten die Szenarientwicklung nicht streng nach einem solchen „bottom-up“-Verfahren verlief, sondern auch vom wissenschaftlichen Überblick über das vorgesehene Lagersystem geleitet und geprüft wurde. Insofern erscheint der HSK die im vorliegenden Sicherheitsbericht von der Nagra dargestellte Methode (vgl. Abschnitt 4.10.1) glaubhaft und mit den internationalen Gepflogenheiten im Einklang. Die HSK begrüsst die Bemühungen der Nagra um eine möglichst realistische Darstellung der angewendeten Methode.

Auf dem Weg von der Systembeschreibung zu den Szenarien und Rechenfällen benützt die Nagra verschieden Hilfsmittel und Zwischenergebnisse, so z.B. die Auflistung der „wichtigen sicherheitsrelevanten Phänomene“ sowie die Definition und Auflistung der Super-FEPs. Zur Kontrolle der Vollständigkeit werden diese Listen untereinander und mit der OPA-FEP-Datensammlung verglichen. Die Dokumentation und der Vergleich der Listen ist in NTB 02-23 klar und verständlich dargelegt. Die Reihenfolge der einzelnen Aktivitäten bei der Ableitung der Szenarien und Rechenfälle ist hingegen nicht immer aus der Dokumentation klar ersichtlich. Beispielsweise ist unklar, ob die Rechenfälle direkt aufgrund des Systemverständnisses, oder erst aufgrund der Liste der wichtigen sicherheitsrelevanten Phänomene oder der Super-FEPs festgelegt werden. Die Super-FEPs sind jedenfalls ein Zwischenschritt auf dem Weg zur quantitativen Behandlung der Rechenfälle.

Im Abschnitt 4.3 wurde darauf hingewiesen, dass die Nagra den Begriff Szenarium in spezieller Weise als Bezeichnung für jeweils eine umfassende Gruppe von Zukunftsvarianten verwendet, während die gebräuchlichere Verwendung, der sich auch die HSK bedient, die Bezeichnung jeder beliebigen, gegenüber anderen abgegrenzten Zukunftsvariante ist. Solche Zukunftsvarianten werden im vorliegenden Sicherheitsnachweis als „die Rechenfälle“ angesprochen, sofern sie für die quantitative Analyse ausgewählt wurden. Die HSK hat gegen begriffliche Präzisierungen nichts einzuwenden, möchte aber auf die Gefahr der erschwerten Lesbarkeit hinweisen, wenn zu stark von allgemein gebräuchlichen Begriffsinhalten abgewichen wird. Konsequenterweise verwendet die Nagra den Begriff „Szenarienanalyse“ im vorliegenden Sicherheitsnachweis nicht.

FEPs und Super-FEPs

Zukunftsvarianten werden als Kombinationen von Super-FEPs formalisiert, die selbst FEPs zusammenfassen. Die Super-FEPs werden anschliessend in berechenbare Vorgänge (Rechenfälle) umgesetzt. Bei diesem Schritt sind auch allfällige wechselseitige Beeinflussungen der FEPs zu beachten. Die kurze Beschreibung der FEPs in der FEP-Datensammlung (NTB 02-23) lässt in einigen Fällen auf solche Abhängigkeiten schliessen (z.B. beim FEP 4.04 „Chemischer Einflussbereich vom LMA-Lager“, wo auf den Zusammenhang mit Bakterien hingewiesen wird (FEP 2.05)). Die wechselseitige Beeinflussung wird aber nur auf der Ebene der Super-FEPs angesprochen. In einer Tabelle im NTB 02-23 wird festgehalten, in welchen Rechenfällen die wechselseitige Beeinflussung der Super-FEPs berücksichtigt wird. Nach Ansicht der HSK ist dieses Vorgehen im Rahmen des Projekts akzeptabel, obschon eine möglichst umfassende Beschreibung der wichtigsten wechselseitigen Abhängigkeiten im Rahmen der FEP-Datensammlung selber zu begrüssen wäre, um die im Abschnitt 4.10.1 erwähnten Nachteile des „top-down“-Verfahrens zu entschärfen.

Die Gründe, die zur Definition der einzelnen Super-FEPs führten, sind nicht überall klar ersichtlich. Es ist z.B. ungewohnt, dass es keinen Super-FEP mit dem Inhalt „Nuklidmigration“ gibt, obschon es einerseits ein solches „wichtiges sicherheitsrelevantes Phänomen“ (A.5.1 in NTB 02-23, Tabelle A4.1.1) und andererseits auch mehrere entsprechende FEPs gibt.

Gewisse FEPs werden als „nicht von Bedeutung für die Langzeitsicherheit“ nicht in einem Super-FEP eingeschlossen und nicht in den Rechenfällen berücksichtigt. Die Begründungen werden im NTB 02-05 (Kap. 4 und 5) gegeben. Darunter befinden sich auch solche FEPs, die durchaus vorhanden und wirksam sind und nach Ansicht der HSK weiter zu beachten wären. Ein besonderes Beispiel sind die FEPs 6.1/2.08 und 6.1/3.09, die den Transport von Fluiden bzw. Radionukliden im Übergangsbereich vom Bentonit zum Wirtgestein infolge gekoppelter Gradienten (Onsager-Relationen) beschreiben. Während der anfänglichen, durch hohe Temperaturen und Temperaturgradienten gekennzeichneten Zeitspanne sind solche Kopplungen im Bentonit selber vorhanden. Es gibt aber in der Kategorie 4.1 „Bentonit“ der FEP-Datensammlung keine entsprechenden FEPs. In der Liste der wichtigsten sicherheitsrelevanten Phänomene wird die Kopplung angesprochen. Sie wird aber als „voraussichtlich für die Langzeitsicherheit von geringer Bedeutung“ eingestuft und nicht in den Super-FEPs und den Rechenfällen berücksichtigt. Als Grund wird angegeben, dass die Temperaturgradienten nach 1000 Jahren (lange vor dem Behälterversagen) klein geworden sind. Die HSK teilt die Ansicht, dass solche Prozesse nach 1000 Jahren nicht mehr ins Gewicht fallen. Sie kann aber der Schlussfolgerung nicht uneingeschränkt folgen, dass deswegen eine nur geringe Bedeutung für die Langzeitsicherheit vorliegt. Es ist durchaus notwendig zu untersuchen (und die Nagra macht das auch), inwiefern gekoppelte Prozesse während der ersten Jahrhunderte die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der Bentonitverfüllung nachhaltig ändern und ob sie bei besonderen Szenarien (z.B. Verarbeitungsdefekt mit frühem Behälterversagen) wichtig sein könnten. Das Fehlen solcher FEPs in der Kategorie 4.1 „Bentonit“ ist unter diesem Gesichtspunkt nachteilig.

Die Methodik der Nagra sieht vor, dass einzelne FEPs, welche die Lagersicherheit in Frage stellen können und weiterer Untersuchung bedürfen, als noch „offene Fragen“ gekennzeichnet werden. Die Nagra kommt zum Schluss, dass im vorliegenden Projekt keine solchen offenen Fragen bestehen. Die HSK möchte hierzu festhalten, dass beim Nachweis der prinzipiellen Machbarkeit der sicheren Tiefenlagerung die genaue Auslegung der Anlage nicht als

unveränderlich anzusehen ist. Deshalb kann eine Ungewissheit bei der vorgeschlagenen Auslegung durchaus als für die Sicherheit kritisch erscheinen und trotzdem für die Beantwortung der Frage der prinzipiellen Machbarkeit problemlos sein. Die HSK möchte die Schlussfolgerung der Nagra vor allem im letzteren Sinne verstehen.

Rechenfälle

Die erwartete Entwicklung und der dazu gehörige Referenzfall werden in NTB 02-05 (Kap. 5 und 6) ausführlich beschrieben und untersucht. Die HSK begrüsst insbesondere die klare Darlegung der Rückhaltewirkung der Barrieren und des Verbleibs der Radionuklide bis zu ihrem Zerfall. Zu den weniger wahrscheinlichen Entwicklungen möchte die HSK folgende Bemerkungen anbringen:

Das Versagen von Hüllrohren durch lokale Schäden (Lochfrass oder H₂-induzierte Risse) kann zu einer Situation mit einer erhöhten Auflösungsrate des Brennstoffs führen (Abschnitt 4.5.1.1). Es ist anzunehmen, dass diese Möglichkeit durch die „was-wäre-wenn“-Fälle 4.3a und 4.3b (Tabelle 4.10-1) abgedeckt wäre. Die detaillierte Analyse ist aber nicht vorhanden.

Ein unbeabsichtigtes Anbohren des Tiefenlagers ist gemäss Nagra frühestens nach 500 Jahren anzunehmen. Diese Festlegung setzt voraus, dass die Kenntnis der Existenz des Lagers und seines Standorts während 500 Jahre erhalten und der technischen Fachwelt zugänglich bleiben. Im internationalen Vergleich ist die angenommene Zeitspanne als hoch anzusehen. Die entsprechenden Rechenfälle des Alternativen Szenariums 2 würden bei früherem Anbohren (z.B. nach 200 Jahren) zwar zu höheren Dosen, nicht aber zur Verletzung der Schutzziele führen. Allerdings kämen die Dosen bei der ungünstigen Parametervariation 3.1g in die Nähe des Schutzziels 1 der Richtlinie HSK-R-21.

Bei der Betrachtung des unbeabsichtigten Anbohrens des Tiefenlagers wurde nicht untersucht, inwiefern die radiologischen Auswirkungen davon beeinflusst werden, dass das Nahfeld des Tiefenlagers unter erhöhtem Gasdruck steht. Bei einer allfälligen Fortsetzung des vorliegenden Projekts sollte das Alternative Szenarium 2 in diesem und allgemeiner in denjenigen Aspekten ausgebaut werden, die nicht stark von der extremen Ungewissheit über die gesellschaftlichen Bedingungen betroffen sind.

Die HSK beurteilt schliesslich die Frage, ob die von der Nagra betrachteten Szenarien (Rechenfälle) für die Möglichkeiten der zukünftigen Entwicklung ausreichend abdeckend sind, folgendermassen:

Durch die

- Herleitung der Rechenfälle aus der Zusammenstellung der aus wissenschaftlicher Sicht für die Lagersicherheit relevanten Fakten,
- Kontrolle der Herleitung mittels unabhängig dazu erstellter OPA-FEP-Datenbank,
- Absicherung beider Vorgänge durch internationale Vergleiche und die Teilnahme der Nagra an mehreren internationalen Forschungsvorhaben im Bereich der Tiefenlagerung, und
- Prüfung der Szenarienanalyse im Rahmen der Beurteilung des Sicherheitsnachweises durch die Expertengruppe der NEA (NEA 2004),

besteht eine gute Zuversicht, dass mit den Rechenfällen alle wichtigen Beiträge zum durch das Tiefenlager entstehenden radiologischen Risiko erfasst werden können. Die HSK hat aus heutiger Sicht keine weiteren Rechenfälle identifiziert, von denen sie eine ungünstigere Beurteilung der Langzeitsicherheit erwarten müsste. Die hier und in den anderen Abschnitten des Gutachtens aufgeworfenen Fragen sollten aber weiter untersucht werden, um das Prozessverständnis und die Annahmen für die Berechnung der radiologischen Folgen zusätzlich abzusichern.

4.11 Radiologische Auswirkungen

Die einzelnen technischen und natürlichen Barrieren verhindern zunächst, dass Radionuklide aus dem Tiefenlager entweichen. Wenn es im Laufe der Zeit zu einer Mobilisierung der Radionuklide kommt, reduzieren und verzögern die Barrieren ihren Transport in die Biosphäre. Um zu zeigen, dass keine Freisetzung zustande kommt, die unzulässige radiologische Auswirkungen nach sich zieht, ist es notwendig, die zeitliche Entwicklung und Grösse der Nuklidfreisetzung in die Biosphäre und die daraus entstehende Strahlenexposition zu berechnen. Quantitative Berechnungen der Freisetzungsraten der Radionuklide erlauben es auch, die Rückhaltefähigkeiten der einzelnen Barrieren und jene des ganzen Systems zu bewerten. Um die möglichen zukünftigen Entwicklungen abschätzen zu können, müssen mehrere Freisetzungsvarianten berechnet werden.

4.11.1 Konzeptuelle Annahmen

Angaben der Nagra

In NTB 02-06, NTB 02-05 und NTB 02-03 werden der Referenzfall und die weiteren Rechenfälle detailliert beschrieben und die entsprechenden Parameterwerte zur Lager- und Wirtgesteinsgeometrie sowie zu den transportrelevanten Eigenschaften aufgeführt. Zusätzlich zu den verwendeten Referenz-Parameterwerten werden von der Nagra auch untere und obere Grenzwerte aufgelistet, um die realistischerweise zu erwartenden Bandbreiten der jeweiligen Parameterwerte bei optimistischen und pessimistischen Annahmen anzugeben. Die für den Referenzfall verwendeten Daten sind teilweise konservativ gewählt. Die Ausbreitungsrechnungen für den Nuklidtransport durch die technischen Barrieren im Nahfeld des Lagers, durch das Wirtgestein Opalinuston und in der Biosphäre wurden von der Nagra für die meisten Rechenfälle mit den Programmen STMAN, PICNIC beziehungsweise TAME durchgeführt.

Die Nahfeldberechnungen für abgebrannte Brennelemente und verglaste hochaktive Abfälle beinhalten die Freisetzung der Nuklide aus der Abfallmatrix (Brennelement bzw. Glaskörper), den ausschliesslich diffusiven Transport durch die Bentonitverfüllung und den Übertritt in einen postulierten Mischtank an der äusseren Grenze des Bentonits (NTB 02-06, S. C-62). In der Modellvorstellung der Nagra ist die Bentonitverfüllung zum Zeitpunkt des Behälterversagens vollständig mit Wasser gesättigt. Sie liegt als homogenes, radialsymmetrisches Medium vor.

Im Falle der LMA enthalten die Nahfeldberechnungen die Freisetzung der Nuklide aus den Lagertunneln, den diffusiven Transport durch eine dünne Opalinustonschicht („Umhüllung der Zementverfüllung“) aus rechentechnischen Gründen und den Übertritt in einen postu-

lierten Mischtank an der äusseren Grenze der Umhüllung. Die Nagra unterstellt einen instantanen Ausgleich der Radionuklidkonzentration innerhalb der Zementverfüllung.

Die Nagra verwendet in ihrer Modellierung den Ansatz, dass der Nuklidtransport in der Auflockerungszone (EDZ) durch Advektion dominiert sei, und geht deshalb für den Übergang von den technischen Barrieren (Bentonitverfüllung für das BE/HAA-Lager bzw. Zementverfüllung für das LMA-Lager) zur EDZ vom Konzept des Mischtanks aus. Die Aufnahme der Nuklide in diesem Mischtank dient der mathematischen Entkopplung der Nahfeld- und Fernfeld-Rechnungen. Die Mischtank-Randbedingung bedeutet, dass die Rate, mit der die Radionuklide aus der Verfüllung in die EDZ diffundieren, mit der Rate gleichgesetzt wird, mit der sie ins Wirtgestein weitertransportiert werden (NTB 02-06, S. C-62). Um den Nuklidtransport vom Nahfeld in das Wirtgestein mit STMAN berechnen zu können, wird also eine so genannte „effektive Flussrate“ definiert. Die Grösse dieser Flussrate wird so angesetzt, dass sie sowohl den diffusiven wie auch den echten advektiven Anteil des Nuklidtransports im Wirtgestein abdeckt.

Die Nagra hat die Zulässigkeit dieses Ansatzes mit wirklichkeitsnäheren Modellierungen für den Transport schwach sorbierender und nicht löslichkeitslimitierter Nuklide überprüft. Sie hat entsprechende Berechnungen mit dem Programm FRAC3DVS für einige dosisbestimmende, schwach sorbierende Nuklide ($^{14}\text{C}_{\text{org}}$, ^{41}Ca , ^{36}Cl , ^{129}I , ^{79}Se) durchgeführt (NTB 02-06, S. G-3). Die erhaltenen Freisetzungsraten unterschreiten in allen Fällen die entsprechenden Werte der Referenzfallberechnungen.

Beurteilung der HSK

Die Ausbreitungs- und Dosisberechnungen wurden von der Nagra klar dargelegt und dokumentiert. Die betrachteten Fälle decken eine weite Spanne möglicher Zustände und Entwicklungen ab. Ungewissheiten werden mit alternativen Modellen und der Variation von Werten der transportrelevanten Parameter berücksichtigt.

Die HSK beurteilt die grundlegenden Annahmen der Nuklidtransport-Modellierung und der Dosisberechnung als vernünftig. Dies schliesst insbesondere die Annahme eines rein diffusiven Transports durch die Bentonitverfüllung der Lagerstollen für abgebrannte Brennelemente und verglaste hochaktive Abfälle, die Transportmechanismen im Wirtgestein und die Homogenität der hydraulischen Eigenschaften des Opalinustons ein. Die von der NEA beauftragten Experten kamen in ihrer Prüfung der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlands zu ähnlichen Schlüssen (NEA 2004, S. 76, 80 und 81).

Die relative Bedeutung der Advektion im Vergleich zur Diffusion für den Transport von Radionukliden in Tongesteinen mit Durchlässigkeiten im Bereich 10^{-14} - 10^{-12} m/s lässt sich anhand des in NTB 02-05 beschriebenen Rechenfalls 4.8 (vgl. Tabelle 4.10-1) aufzeigen, wo die advektiven Beiträge zum Nuklidtransport vernachlässigt wurden. Die Nagra gibt an, dass die berechnete maximale Strahlendosis gegenüber dem Referenzfall dadurch um rund 64 % reduziert wird. Dieses Resultat würde bedeuten, dass die Advektion und nicht die Diffusion den bedeutenderen Transportprozess im Opalinuston darstellt. Kontrollberechnungen der HSK und anschliessende Neuberechnungen der Nagra für ^{129}I fanden für diesen advektionsfreien Fall eine Reduktion der Dosis um nur 25 %. Dieser Wert steht mit den Erkenntnissen aus Isotopenprofilen im Opalinuston besser im Einklang, die auf einen dominierenden Beitrag der Diffusion hinweisen.

Der Ansatz einer „effektiven Flussrate“ am Übergang zwischen den technischen Barrieren und dem Wirtgestein stellt nach Ansicht der HSK eine starke Vereinfachung des Nuklidtransportmechanismus dar. Dieser Ansatz ist physikalisch nicht korrekt und etwas willkürlich. Auch die Expertengruppe der NEA weist darauf hin, dass die Schnittstelle zwischen den Radionuklidtransportmodellen für das Nahfeld und die Geosphäre auf vereinfachten Ansätzen basiert. Obschon die Experten diesen Ansatz als brauchbar akzeptieren, halten sie fest, dass die Konservativität des Ansatzes nicht offensichtlich ist. Sie empfehlen, in zukünftigen Anwendungen vermehrt voll gekoppelte Modelle zu verwenden, um die Nachvollziehbarkeit und Genauigkeit der Analyse zu verbessern (NEA 2004, S. 77). Die HSK schliesst sich dieser Empfehlung an.

Im Falle einer Fortführung des Projekts erwartet die HSK, dass die Nagra den zukünftigen Berechnungen der Freisetzungsraten eine Modellierung der Schnittstelle zwischen Nah- und Fernfeld zu Grunde legt, die die physikalischen Prozesse besser abbildet.

4.11.2 Beschreibung des Referenzfalls

Angaben der Nagra

Der Referenzfall ist der Basisfall der Referenzkonzeptualisierung. Er beruht auf der Annahme, dass die im Rahmen des Referenzszenariums erwartete Entwicklung des Tiefenlagers eintritt. Die Berechnungen der radiologischen Auswirkungen beruhen auf Referenzwerten der einzelnen Parameter. Die wichtigsten Parameter sind in Tabelle 4.11-1 aufgelistet.

Modellierung der Nuklidfreisetzung aus den Abfällen

(i) Abgebrannte Brennelemente

Die Behälter verlieren über einen längeren Zeitraum durch korrosive Prozesse allmählich ihre Dichtigkeit. In der Modellierung geht die Nagra von der konservativen Annahme aus, dass alle Endlagerbehälter gleichzeitig nach 10'000 Jahren ihre Einschlussfähigkeit verlieren und sich die Leerräume in den undicht gewordenen Behältern sofort mit Wasser füllen. Die Hüllrohre der abgebrannten Brennelemente bilden keine hydraulische Barriere. Nach Zutritt von Wasser ins Innere der Abfallbehälter lösen sich die Brennelemente durch korrosive Prozesse langsam auf. Die Nagra quantifiziert die Auflösungsraten für die abgebrannten Brennelemente und listet in Tabellenform den jährlich aufgelösten Anteil der Brennstoffmatrix zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf (NTB 02-06, S. C-60).

Das Modell berücksichtigt folgende drei Anteile der Nuklidfreisetzung (siehe Abschnitt 4.5.1.1): Erstens die IRF, zweitens die Freisetzung aus der Zersetzung der Brennelementhülle und drittens die Freisetzung durch die Auflösung der Brennstoffmatrix. Die relativen Anteile sind abhängig vom Brennelementtyp wie auch vom betrachteten Nuklid (NTB 02-06, S. C-41).

Tabelle 4.11-1: Wichtigste Parameter und Werte für den Referenzfall der Nagra. Aufgrund der Vielzahl der nuklidspezifischen Werte sind die Tabellenbezeichnungen in NTB 02-06 angegeben.

Parameter	Brennelemente	HAA	LMA
Abfälle			
Sicherheitsrelevante Nuklide	Tab A3.4-1		
Nuklidinventar	Tab. A3.4-2a-c		
Anzahl Behälter	935/680/450 (SWR/DWR/DWR-MOX)	270/460 (BNFL/Cogéma)	-
Anteil sofortiger Freisetzung (IRF)	Tab A3.4-2a	-	-
Matrix-Auflösungsrate	Tab A3.6-1	$5.5 \cdot 10^{-4} / 7.3 \cdot 10^{-5}$ (BNFL/Cogéma)	-
Einschlusszeit im Behälter (Jahre)	10'000	10'000	100
Nahfeld			
Innenradius der Verfüllung (m)	0.525	0.47	-
Aussenradius der Verfüllung (m)	1.15	1.15	4.5/2.9 (LMA-1/LMA-2)
Löslichkeitslimiten	Tab. A3.5-1		Tab. A3.5-3
Sorptionskoeffizienten	Tab. A3.5-2		Tab. A3.5-4
Diffusionskoeffizienten Bentonit	Tab. A3.5-2		-
Effektive Flussrate m ³ /a (Mischtank)	$6.0 \cdot 10^{-3}$	$4.0 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-3} / 1.6 \cdot 10^{-3}$ (LMA-1/LMA-2)
Fernfeld			
Advektive Geschwindigkeit (m/a)	$6.3 \cdot 10^{-7}$		
Sorptionskoeffizienten Fernfeld	Tab A3.5-5		
Diffusionskoeffizienten Fernfeld	Tab A3.5-5		

(ii) Verglaste hochaktive Abfälle

Nach Abfüllen der heissen Abfallglasschmelze in die Kokillen treten durch Abkühlung Spannungen im Glas auf. Risse entstehen im Glasblock und erhöhen so die Oberfläche des Glases. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wird das Glas im Modell mit einer Anzahl Glaskugeln mit identischem Durchmesser beschrieben. Der Durchmesser und die Anzahl dieser Kugeln werden so festgesetzt, dass das totale Glasvolumen und auch die totale Oberfläche gleich gross sind wie bei den durch Spannungsrisse entstandenen Glasblöcken.

Die Nagra nimmt zusätzlich an, dass die Glaskorrosionsrate pro Oberflächeneinheit konstant bleibt. Mit den von der Nagra angegebenen Werten findet man für die Auflösungszeiten der Glaskugeln $6.8 \cdot 10^5$ Jahre für Cogéma-, beziehungsweise $9 \cdot 10^4$ Jahre für BNFL-Gläser.

(iii) Langlebige mittelaktive Abfälle

Im Falle der LMA geht das Referenzfallmodell davon aus, dass sich 100 Jahre nach der Einlagerung die Lagertunnel LMA-1 und LMA-2 vollständig mit Wasser aufgesättigt haben. Die Nagra nimmt an, dass sich die aus den LMA stammenden Nuklide während der hundertjährigen Lagerzeit gleichmässig über die Zementverfüllung der Lagertunnel verteilt haben. Dort

sind die Nuklide entweder im Zementporenwasser gelöst (maximal bis zur Löslichkeitsgrenze) oder an den Porenwänden adsorbiert. Wegen der Nuklidsorption und der Löslichkeitslimitierungen in der Zementmatrix steht anfänglich nur der sich in Lösung befindliche Teil des Nuklidinventars für Transportprozesse zur Verfügung. Nach Einsetzen der Nuklid-diffusion ins Wirtgestein werden ehemals sorbierte oder aus den Actiniden-Zerfallsketten erzeugte Nuklide nach und nach über einen langen Zeitraum ins Zementporenwasser abgegeben.

Modellierung der Diffusionsprozesse im Bentonit

Die Nagra verwendet für die Diffusionsberechnungen im Bentonit in ihrem Referenzfall zwei Werte für den effektiven Diffusionskoeffizienten (siehe Abschnitt 4.5.3.9). Der eine ist von der Diffusivität von tritiiertem Wasser (HTO) abgeleitet und beträgt $D_e = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Er wird für die meisten Radionuklide verwendet und beinhaltet die Gesamtporosität von 0.36. Der zweite Diffusionskoeffizient gilt für Elemente, die im Nahfeld als stabile Anionen auftreten oder so modelliert werden (C_{inorg} , Cl, Se, Mo, I, Po). Er beträgt $D_e = 3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, bezogen auf eine reduzierte Porosität von 0.05, und wird verwendet, um die durch die negativen Oberflächenladungen im Bentonit verursachte Abstossung zu simulieren.

Modellierung der Nuklidausbreitung im Fernfeld

Die Fernfeldberechnungen beschreiben den zeitlichen Verlauf des Nuklidtransports durch das Wirtgestein Opalinuston. Das Tiefenlager wird in der Mitte der Opalinustonschicht angelegt, woraus für den Nuklidtransport im intakten Gestein kürzeste Migrationslängen von 40–50 m bis zur unteren beziehungsweise oberen Begrenzung des Wirtgesteins resultieren. Die Nagra geht konservativerweise von nur 40 m aus mit nachfolgendem direkten Übertritt der Radionuklide in die Biosphäre. Das Wirtgestein ist mit Wasser aufgesättigt und wird als homogenes und zeitlich unveränderliches Medium betrachtet. Der Transport der im Porenwasser des Wirtgesteins gelösten Nuklide durch den Opalinuston wird mathematisch durch eine eindimensionale Transportgleichung beschrieben. Die Nagra nimmt an, dass im Wirtgestein für alle Nuklide die Löslichkeitslimiten nicht erreicht werden.

Analog zum Bentonit verwendet die Nagra auch für das Fernfeld zwei Werte für den effektiven Diffusionskoeffizienten. Der Diffusionskoeffizient $D_e = 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ wird für die meisten Radionuklide verwendet und beinhaltet eine Gesamtporosität von 0.12. Der Diffusionskoeffizient $D_e = 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ gilt für Elemente, die als stabile Anionen auftreten oder so modelliert werden (C_{inorg} , Cl, Se, Mo, I, Po). Er ist bezogen auf eine reduzierte Porosität von 0.06. Die Diffusionskoeffizienten gelten für die Temperatur des Wirtgesteins von 38°C und für die Diffusion senkrecht zur Gesteinsschichtung ($D_{e\perp}$).

Zusätzlich zu diesen Werten werden D_e -Werte für die Diffusion parallel zur Gesteinsschichtung ($D_{e=}$) angegeben. Diese sind um den Faktor 5 grösser als die entsprechenden $D_{e\perp}$ -Werte. Trotzdem hat die Diffusion senkrecht zur Gesteinsschichtung eine grössere Bedeutung für die Freisetzung, da dieser Transportpfad im Gegensatz zur parallelen Diffusion auf dem kürzesten Weg aus dem Wirtgestein hinausführt.

Im Unterschied zu den Nahfeldberechnungen wird im Referenzfall für den Opalinuston angenommen, dass darin neben der Diffusion auch Nuklidtransport durch Advektion stattfindet. Es wird ein hydraulischer Gradient von 1 angenommen, der aus der Potenzialdifferenz zwischen Wedelsandstein und Stubensandstein abgeleitet ist. Der Opalinuston ist eine sehr

geringdurchlässige Barriere ($K_h = 10^{-13}$ m/s, $K_v = 2 \cdot 10^{-14}$ m/s, siehe Abschnitt 2.4.1). Mit den Werten von K_v und dem hydraulischen Gradienten berechnet sich der Referenzwert der Advektionsgeschwindigkeit zu $6.3 \cdot 10^{-7}$ m/a.

Biosphärenmodellierung

Das von der Nagra verwendete Biosphärenmodell TAME (siehe Abschnitt 4.9) berechnet aus der Radionuklidfreisetzung aus der Geosphäre in die Biosphäre die radiologische Individualdosis für Mitglieder der kritischen Bevölkerungsgruppe. Die Berechnung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird die Biosphäre in einzelne Zellen unterteilt und der Übertritt von Radionukliden zwischen diesen Zellen wird anhand von Transferfaktoren berechnet. Im zweiten Schritt wird ein Expositionspfad-Modell verwendet, das die verschiedenen Aufnahmemechanismen der Nahrungsmittelkette berücksichtigt, um die Individualdosis zu berechnen.

Beurteilung der HSK

Die HSK hat ihre Anmerkungen zu den Mechanismen der Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen und zu den Eigenschaften der Verfüllungen bereits in den Abschnitten 4.5 und 4.6 dargelegt. Kommentare zur Nuklidausbreitung im Wirtgestein sind im Abschnitt 4.7 aufgeführt.

Das Vorgehen der Nagra bei der Biosphärenmodellierung entspricht der auch in anderen Ländern üblichen Praxis. Das Biosphärenmodell und die darin verwendeten Parameterwerte wurden von der HSK nur grob geprüft. Eine wichtige Grösse zur Bestimmung der Individualdosis ist die Verdünnung der Nuklide in den Aquiferen, da die berechnete Dosis proportional zur Verdünnung ist. Die HSK bewertet die von der Nagra verwendeten Angaben zur Verdünnung der Radionuklide in den Aquiferen als vernünftig. Die HSK empfiehlt, dass die Nagra bei einer allfälligen Fortführung des Projekts die Zweckmässigkeit und Belastbarkeit der Modellierung mit weiteren experimentellen Daten belegt.

4.11.3 Resultate des Referenzfalls

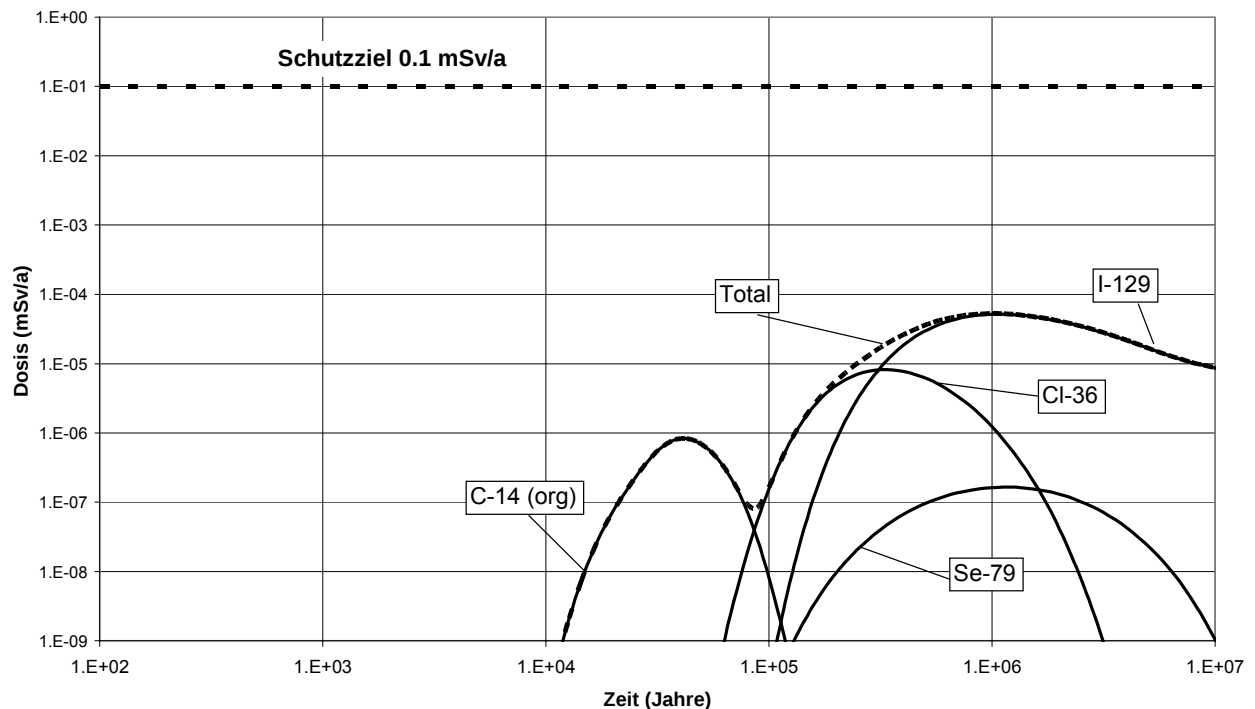
Angaben der Nagra

Die Strahlendosen stammen hauptsächlich von wenigen schwachsorbierenden, gut löslichen Nukliden wie ^{129}I , ^{36}Cl und $^{14}\text{C}_{\text{org}}$ und in geringerem Masse auch von ^{79}Se . Die Actiniden werden von der Bentonitverfüllung und vom Opalinuston in starkem Masse durch Sorption zurückgehalten.

Das berechnete Dosismaximum wird nach rund 1 Million Jahren erreicht und unterschreitet das behördliche Schutzziel von 0.1 mSv/a um mehr als drei Grössenordnungen (Siehe Fig.4.11-1).

Beurteilung der HSK

Die HSK hat den Referenzfall der Nagra mit eigenen Rechenprogrammen geprüft (HSK 35/91, HSK 35/92) und kann die Resultate der Berechnungen der Nagra für abgebrannte Brennelemente, HAA und LMA nachvollziehen. Die HSK erhält dieselben Freisetzungsraten wie die Nagra aus Nah- und Fernfeld und auch dieselben Strahlendosen.



Figur 4.11-1: Zeitliche Entwicklung der im Referenzfall berechneten Dosen. Die Dosen sind durch die Beiträge der langlebigen, schwach sorbierenden Radionuklide ^{129}I , ^{36}Cl und $^{14}\text{C}_{\text{org}}$ bestimmt. Die totale, maximale Dosis unterschreitet das behördliche Schutzziel von 0.1 mSv/a um mehr als drei Grössenordnungen.

Die HSK hat für die Berechnungen der Nuklidausbreitung im Nahfeld das Rechenprogramm TUBE, das nach der Methode der finiten Differenzen arbeitet, verwendet. Die Berechnungen der Nuklidausbreitung im Fernfeld wurden mit dem Programm FEMTRAC, das auf der Methode der finiten Elemente beruht (HSK 21/31), durchgeführt. Beide Programme wurden von der HSK entwickelt. Die Radionuklidfreisetzungen in die Biosphäre wurden mit einem vereinfachten Biosphärenmodell in jährliche Individualdosen umgerechnet.

Die HSK hat ihren eigenen Referenzfall definiert. Im Referenzfall der HSK werden die Berechnungen mit den von der HSK gesetzten Werten für die nuklidabhängigen Löslichkeitslimiten und Sorptionskoeffizienten durchgeführt (Referenzwerte in Tabellen 4.5-3, 4.5-4, 4.6-2, 4.6-3 und 4.7-2). Alle anderen Parameterwerte sind gleich gewählt wie im Nagra-Referenzfall. Die relevanten Transportparameter der für die Dosis massgebenden Radionukliden ^{129}I , ^{36}Cl und $^{14}\text{C}_{\text{org}}$ sind in beiden Referenzfällen nur unwesentlich verschieden. Die Resultate der Berechnungen des Referenzfalls der Nagra und des Referenzfalls der HSK stimmen deshalb in sehr guter Näherung überein.

4.11.4 Weitere Rechenfälle

Angaben der Nagra

Die Nagra betrachtet eine Vielzahl vom Referenzfall abweichender Rechenfälle. Eine Zusammenfassung der Resultate dieser Fälle mit den maximalen Dosen ist in NTB 02-05,

Tab. 8.2-2 aufgeführt. In allen betrachteten Rechenfällen wird das behördliche Schutzziel von 0.1 mSv/a deutlich unterschritten.

Im Folgenden werden einige der Fälle kurz diskutiert. In Klammern sind die Rechenfallbezeichnung der Nagra, die maximale Dosis und der Zeitpunkt der maximalen Dosis angegeben (NTB 02-05, Tab. 8.2-2). Für den Referenzfall der Nagra gilt beispielsweise (Fall 1.1a, Dosis $5.3 \cdot 10^{-5}$ mSv/a, Zeitpunkt der maximalen Dosis $1.0 \cdot 10^6$ a).

- Versagen der Endlagerbehälter für abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle nach 1000 statt wie im Referenzfall 10'000 Jahren (1.1c, $5.7 \cdot 10^{-5}$ mSv/a, $1.0 \cdot 10^6$ a): Aufgrund des angenommenen, schnelleren Beginns der Nuklidfreisetzung werden gegenüber dem Referenzfall zwar vermehrt Nuklide mit Halbwertszeiten unter 10^4 Jahren, beispielsweise ^{93}Mo , in die Bentonitverfüllung freigesetzt. Die retardierenden Transporteigenschaften des Bentonits und des Opalinustons (NTB 02-05, Fig. 6.6-4) sorgen aber dafür, dass wie im Referenzfall der Nagra die Nuklide ^{129}I , ^{36}Cl , ^{79}Se und $^{14}\text{C}_{\text{org}}$ dosisbestimmend sind. Die maximale Dosis erhöht sich gegenüber dem Referenzfall nur um rund 10 %.
- Ungewissheiten bezüglich der Sorptionsdaten und Löslichkeitslimiten (1.1d, $6.3 \cdot 10^{-5}$ mSv/a, $8.9 \cdot 10^5$ a) und (1.1 i, $1.2 \cdot 10^{-4}$ mSv/a, $4.8 \cdot 10^5$ a): Schlecht quantifizierbare Eigenschaften werden mit entsprechend grosszügigen Parametervariationen abgedeckt. Die Verwendung dieser Parameterwerte in den Ausbreitungsrechnungen kommt einem Test der Robustheit des Tiefenlagersystems gleich. Da die totalen Dosen durch die Beiträge der langlebigen, schwach sorbierenden Radionuklide ^{129}I , ^{36}Cl , $^{14}\text{C}_{\text{org}}$ und ^{79}Se bestimmt sind, sind auch bei Annahme pessimistischer Werte für die Löslichkeitslimiten (^{79}Se) und Sorptionskoeffizienten (^{129}I) die maximalen Dosen gegenüber dem Referenzfall nur um rund einen Faktor 2 verschieden. Die Rückhalteeigenschaften der Bentonitverfüllung und des Opalinustons reduzieren die Dosisbeiträge der restlichen Nuklide auf unbedeutende Werte.
- Schnellere Glasauflösung aufgrund einer höheren Glasauflösungsrate (1.1e, $5.3 \cdot 10^{-5}$ mSv/a, $1.0 \cdot 10^6$ a): Die Nagra verwendet für ihre Berechnungen eine stark erhöhte Glasauflösungsrate von $4.0 \cdot 10^{-2}$ kg/m²a gegenüber den im Referenzfall gesetzten Werten für BNFL-Glas ($5.5 \cdot 10^{-4}$ kg/m²a) und Cogéma-Glas ($7.3 \cdot 10^{-5}$ kg/m²a). Aufgrund der retardierenden Transporteigenschaften des Wirtgesteins ändert sich die maximale Dosis gegenüber dem Referenzfall nicht.
- Erhöhter advektiver Fluss im Wirtgestein (1.1f, $2.1 \cdot 10^{-4}$ mSv/a, $3.8 \cdot 10^5$ a und 4.1a, $2.0 \cdot 10^{-3}$ mSv/a, $6.2 \cdot 10^4$ a): Die Nagra testet die Robustheit ihrer Modellvorstellungen mit einer 10-fachen und einer 100-fachen Erhöhung des advektiven Flusses durch die Opalinustonschicht. Die Maximaldosen erhöhen sich dabei um weniger als zwei Grössenordnungen und bleiben weit unterhalb des Schutzziels. Die starke Erhöhung des advektiven Flusses durch das Wirtgestein beschleunigt zwar die Radionuklid-Freisetzung in die Biosphäre, die Einhaltung der behördlichen Limite ist dennoch gewährleistet.
- Verminderung der Rückhaltefähigkeit des Nahfelds durch veränderte Eigenschaften der Bentonitbarriere (1.3, $5.3 \cdot 10^{-5}$ mSv/a, $1.0 \cdot 10^6$ a): Die Nagra nimmt an, dass durch die anfänglich erhöhten Temperaturen im Nahfeld der abgebrannten Brennelemente und HAA die Eigenschaften der Bentonitverfüllung verändert werden. Die Verfüllung wird für die Ausbreitungsrechnungen in zwei gleich dicke Bereiche unterteilt. Im inneren Teil der

Bentonitverfüllung wird als Porendiffusionskoeffizient für die Nuklide der Wert für freies Wasser angenommen, im äusseren Teil gelten unverändert die Werte des Referenzfalls. Die Berechnung zeigt, dass sich die maximale Dosis gegenüber dem Referenzfall nur unwesentlich erhöht.

- Schnellere (10- respektive 100-fache) Auflösung der abgebrannten Brennelemente (4.3a, $1.9 \cdot 10^{-4}$ mSv/a, $1.6 \cdot 10^6$ a und 4.3b, $5.1 \cdot 10^{-4}$ mSv/a, $1.0 \cdot 10^6$ a): In den beiden „what-if“-Fällen liegen die Auflösungsraten jenseits experimentell bestimmter Werte. Die Resultate der Berechnungen zeigen, dass die Dosen nicht proportional zu den Auflösungsraten ansteigen, da die Dosen von einer Vielzahl von Parametern mitbestimmt sind.
- Ausbreitungsrechnungen mit auf Null herabgesetzten Sorptionskoeffizienten für ^{129}I (4.10, $1.2 \cdot 10^{-4}$ mSv/a, $4.8 \cdot 10^5$ a): Das langlebige und schwach sorbierende Nuklid ^{129}I liefert den Hauptanteil der Dosis. Die zeitliche Entwicklung der Freisetzungsrates von ^{129}I in die Biosphäre ändert sich im Vergleich zum Referenzfall der Nagra im Wesentlichen in folgenden zwei Punkten: Bei der Rechnung mit einem Sorptionswert von $K_d = 0 \text{ m}^3/\text{kg}$ (sowohl im Opalinuston als auch im Bentonit) wird das Freisetzungsmaximum früher erreicht als bei der Rechnung mit den Referenzsorptionswerten. Der Wert der maximalen Freisetzungsrates vergrössert sich gegenüber dem Referenzfall der Nagra um einen Faktor 2.3. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund des kleinen advektiven Flusses im Wirtgestein die Dosis das behördliche Schutzziel von 0.1 mSv/a dennoch um drei Grössenordnungen unterschreitet.
- Reduktion der Migrationslänge im Wirtgestein von 40 auf 30 Meter (4.11, $8.8 \cdot 10^{-5}$ mSv/a, $5.5 \cdot 10^5$ a): Während die im Referenzfall vorausgesetzte Migrationslänge von 40 m für den überwiegenden Teil des Tiefenlagers eine konservative Annahme darstellt, ist sie für einige wenige Endlagerbehälter als realistisch einzustufen. Um die Robustheit des Tiefenlagers zu testen, wurde deshalb für die Ausbreitungsrechnungen die Migrationslänge im Wirtgestein auf 30 m reduziert. Die maximale Dosis erhöht sich gegenüber dem Referenzfall um 66 %.
- Endlagerbehälter mit Kupferhülle (5.3a, $4.8 \cdot 10^{-5}$ mSv/a, $1.1 \cdot 10^6$ a): Die angenommene Lebensdauer der Behälter für abgebrannte Brennelemente beträgt 100'000 Jahre. Daher werden die Radionuklide gegenüber dem Referenzfall für eine zehnfach längere Dauer vollständig eingeschlossen. Da die Strahlendosen durch langlebige, schwach sorbierende Nuklide wie ^{129}I , ^{36}Cl und $^{14}\text{C}_{\text{org}}$ bestimmt sind, ändern sich die radiologischen Auswirkungen gegenüber dem Referenzfall der Nagra kaum: Die maximale Dosis sinkt gegenüber dem Referenzfall um rund 10 %. Aufgrund der angenommen längeren Einschlussfähigkeit der Endlagerbehälter mit Kupferhülle (10^5 Jahre statt 10^4 Jahre für Stahlbehälter) tritt die maximale Dosis entsprechend später auf ($1.1 \cdot 10^6$ statt $1.0 \cdot 10^6$ a).

Beurteilung der HSK

Die HSK hat neben dem Referenzfall der Nagra einige weitere Rechenfälle der Nagra durch Kontrollberechnungen überprüft und keine Differenzen gefunden (HSK 35/100). Im Einzelnen sind dies (Nummerierung gemäss Tab. 4.10-1):

- Behälterversagen nach 1000 statt 10'000 Jahren (1.1c).

- Schnellere Glasauflösung aufgrund einer grösseren Glasauflösungsrate von $4.0 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^2\text{a}$ der eingelagerten HAA-Gläser (1.1e).
- Erhöhter advektiver Fluss im Wirtgestein mit einer 10- resp. 100-fachen Erhöhung des advektiven Flusses durch die Opalinustonschicht (1.1f und 4.1a).
- Schnellere Auflösung der abgebrannten Brennelemente mit jeweils 10- und 100-fach grösseren Auflösraten (4.3a und 4.3b).
- Ausbreitungsrechnungen mit auf Null reduzierten Sorptionskoeffizienten für ^{129}I (4.10).
- Radiologische Auswirkungen bei Verwendung eines Endlagerbehälters mit Kupferhülle (5.3a).

Die HSK hat die nachfolgenden ergänzenden Berechnungen nach eigenen Vorgaben durchgeführt, um die Robustheit des Tiefenlagersystems weitergehend zu testen. Sie setzt auch bei diesen Berechnungen voraus, dass die zeitliche und räumliche Homogenität und Konstanz der transportrelevanten Parameter im betrachteten Zeitraum weitgehend erhalten bleiben. Die Resultate geologischer Untersuchungen unterstützen die Gültigkeit dieser Annahme. Auch das im Tiefenlager entstehende Gas führt nach heutigem Wissensstand zu keinen dauernden Beschädigungen des Wirtgesteins und so zu keinen neuen hydraulischen Wegsamkeiten. In allen berechneten Fällen wurde das behördliche Schutzziel von 0.1 mSv/a deutlich unterschritten.

1. Ungewissheiten in den Sorptionsdaten und Löslichkeitslimiten: Wie die Nagra ist auch die HSK der Ansicht, dass schlecht quantifizierbare Ungewissheiten mit entsprechend grosszügigen Parametervariationen abgedeckt werden sollen. Die Berechnung mit konservativen Werten der HSK (Tab. 4.5-3, Tab. 4.5-4, Tab. 4.6-2, Tab. 4.6-3 und Tab. 4.7-2) in Ausbreitungsrechnungen kommt daher einem Test der Robustheit des Tiefenlagersystems gleich.
2. Verminderung der Rückhaltefähigkeit des Nahfelds durch eine Reduktion der Bentonitverfüllung: Ein grosser Anteil der Bentonitverfüllung wird über längere Zeiten Temperaturen von mehr als 100°C ausgesetzt sein. Die HSK hat deshalb einen pessimistischen Fall berechnet, in dem nur die äussersten 10 cm der Bentonitverfüllung ihre geochemischen Eigenschaften behalten und der innere Teil der Bentonitverfüllung keine hydraulische und chemische Barriere mehr darstellt. Aufgrund der grossen Rückhaltefähigkeit der verbleibenden Bentonitverfüllung und des Wirtgesteins wird das Dosissschutzziel auch in diesem pessimistischen Fall unterschritten.
3. Reduktion der Migrationslänge im Wirtgestein von 40 auf 20 Meter: Die Berechnung für die Ausbreitung des schwach sorbierenden, gut löslichen Nuklids ^{129}I aus abgebrannten Brennelementen zeigt, dass bei einer Halbierung der Migrationslänge die maximale Dosis gegenüber dem Referenzfall der Nagra nur um rund einen Faktor 3 ansteigt.
4. Erhöhung der IRF des Nuklidinventars aus abgebrannten Brennelementen: Die HSK hat Berechnungen der maximalen Dosis in Abhängigkeit der IRF von ^{129}I durchgeführt. Die Resultate zeigen, dass die Dosis proportional zur IRF ansteigt. Bei Annahme eines pessimistischen Wertes der IRF für ^{129}I von 32 % für alle abgebrannten Brennelemente erhöht sich die Dosis um einen Faktor 3.6 gegenüber dem Referenzfall und verbleibt deutlich unterhalb des behördlichen Schutzziels.

4.11.5 Probabilistische Betrachtungen

Angaben der Nagra

Als Ergänzung zu den deterministischen Analysen hat die Nagra auch probabilistische Berechnungen durchgeführt. Der Zweck der probabilistischen Analysen war, die Empfindlichkeit der Modellresultate gegenüber der gleichzeitigen Variation mehrerer Parameter umfassend zu überprüfen, aber auch einen Hinweis auf die Einhaltung des risikobezogenen Schutzziels 2 der Richtlinie HSK-R-21 zu geben (NTB 02-05, S. 57 und 226). Bei diesen Berechnungen wird eine grosse Anzahl von Ausbreitungsberechnungen mit unterschiedlichen Kombinationen von Parameterwerten durchgeführt. Die Parametersätze werden entsprechend der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der einzelnen Parameter ausgewählt. Korrelationen werden entweder als vollständig (z.B. Diffusionskonstanten aller Nuklide) oder als nicht vorhanden angenommen (NTB 02-06, Appendix A3.10). Die probabilistischen Analysen werden für den Referenzfall in der Referenzkonzeptualisierung gemacht (13 unabhängige Parametergruppen, 1000 Parametersätze) sowie für einzelne der „was wäre wenn“-Fälle (1000 Parametersätze).

Das Ergebnis der Berechnungen ist eine grosse Anzahl von Dosiskurven mit einer statistischen Häufigkeit, die der Wahrscheinlichkeit der Parametersätze entsprechen. Je nach Fragestellung wertet die Nagra diese Resultate unterschiedlich aus. Um die Empfindlichkeit auf bestimmte Parameterkombinationen zu entdecken und darzulegen, werden die Ergebnisse durch die Wiedergabe einzelner „interessanter“ Dosiskurven gezeigt. Die volle Statistik der Ergebnisse wird auf zwei Arten gezeigt: Einerseits werden die absolute Streubreite, der Medianwert und das 95 %-Quantil angegeben, die mit dem Schutzziel 1 verglichen werden können. Andererseits wird die komplementäre Verteilungsfunktion (CCDF, complementary cumulative distribution function) angegeben, die mit dem Schutzziel 2 verglichen wird. Die Nagra stellt fest, dass in allen Berechnungen die Schutzziele eingehalten werden. Sie diskutiert anhand der „interessanten“ Dosiskurven die Bedeutung der Parameter und bestimmt aus der Korrelation zwischen Parameterwert und Dosismaximum die relative Wichtigkeit der Parameter.

Beurteilung der HSK

Die probabilistischen Berechnungen sind, was die Durchführung betrifft, nicht gut dokumentiert. Insbesondere macht die Nagra keine Angaben zum Vorgehen bei der Auswahl der Parametersätze. Die benützten Wahrscheinlichkeitsverteilungen und die Ergebnisse sind hingegen ausreichend dargelegt. Die HSK unterstützt die Verwendung der probabilistischen Analyse mit der Zielsetzung, die die Nagra nennt, und beurteilt die Art der Auswertung als grundsätzlich richtig. Sie hat dennoch folgende Hinweise anzubringen:

Bei der Analyse des Referenzfalls müssen mindestens 13 Parametergruppen entsprechend ihren Wahrscheinlichkeitsverteilungen variiert werden (NTB 02-06, Appendix A3.10). Es ist nicht ersichtlich, wie dann mit 1000 Parametersätzen eine aussagekräftige Statistik der Ergebnisse erzeugt werden kann. Angenommen, es würden nur zwei Werte jeder Parametergruppe verwendet, hätte es bereits mindestens $2^{13} = 8192$ mögliche Parametersätze. Werden von jeder Parametergruppe 3 Werte abgerufen, hat es mindestens $3^{13} = 1.6 \cdot 10^6$ mögliche Parametersätze. Unter diesen Umständen darf insbesondere dem resultierenden

95 %-Quantil bei der vorliegenden Berechnung kein allzu grosses Gewicht beigemessen werden.

Es wurde bereits im Abschnitt 4.3 darauf hingewiesen, dass die Angabe des Schutzziels 2 der Richtlinie HSK-R-21 als eine Linie in einer Darstellung der CCDF nicht korrekt ist. Das Schutzziel begrenzt ein Gesamtrisiko aus seltenen Zukunftsvarianten, also eine Summe von Produkten jeweils einer Dosis mit ihrer Wahrscheinlichkeit. Eine solche Summe kann in der Graphik der CCDF nicht gezeigt werden. Das für die CCDF formulierte Kriterium der Nagra stellt je nach Fall eine schwächere oder stärkere Anforderung als das Schutzziel 2 dar.

Die Darstellung des Medianwerts, des 95 %-Quantils und der deterministischen Dosiskurve für den Referenzfall in NTB 02-05 (Figur 7.4-3b) zeigt in eindrücklicher Weise, warum die probabilistische Analyse als Ergänzung der deterministischen Analyse wichtig ist: Bei allen 3 Abfallsorten BE, HAA und LMA ist die deterministische Kurve nahe beim Median. Bei den HAA sind Median und deterministische Kurve sogar fast identisch. Das heisst dass mit etwa 50 % Wahrscheinlichkeit eine höhere maximale Dosis als diejenige der deterministischen Kurve erwartet werden muss. Das 95 %-Quantil liegt deutlich höher als die deterministische Kurve. Der Erwartungswert der Kurven wird in der Figur nicht gezeigt. Er würde über das Gesamtrisiko Auskunft geben. Schliesslich ist aber zu bemerken, dass alle betrachteten Parametersätze zu maximalen Dosen führten, die weit unter dem Schutzziel 1 liegen. Daraus, und aus der Verteilung der Werte lässt sich, mit Vorbehalt wegen der schwachen Statistik, auch darauf schliessen, dass das Schutzziel 2 im betrachteten Szenarienbereich (Referenzfall und Referenzkonzeptualisierung) nicht verletzt wird.

4.11.6 Zusammenfassende Bewertung und Folgerungen

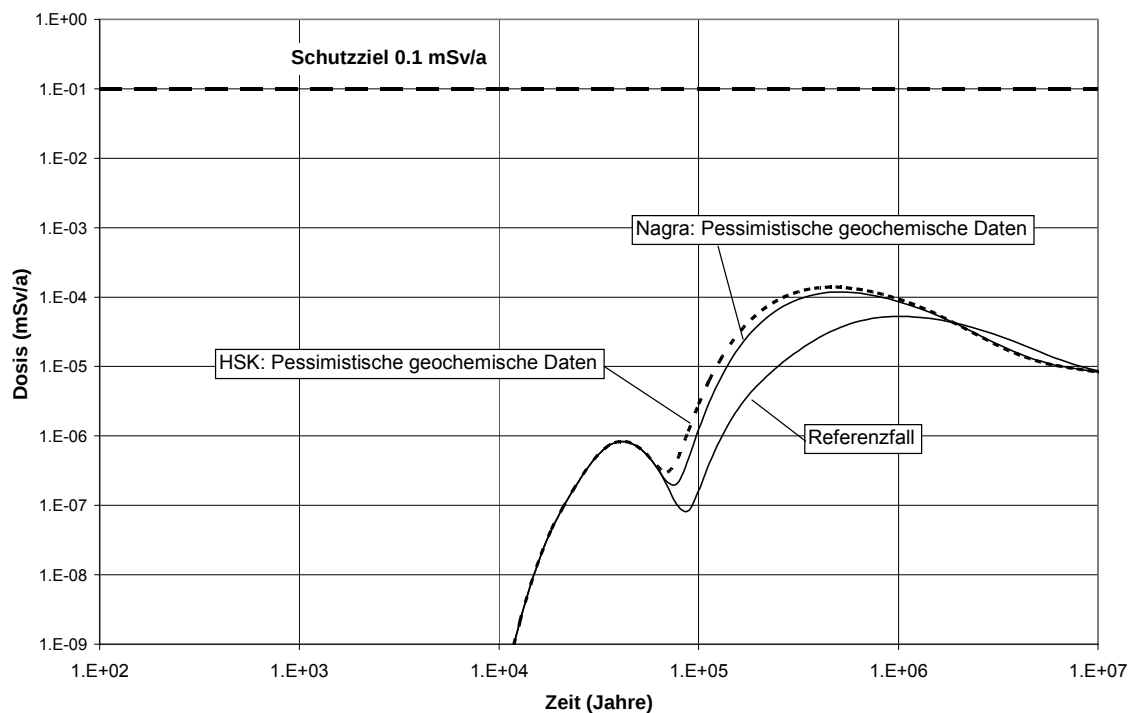
Die HSK hat die Modellierung der Nagra zur Radionuklidausbreitung geprüft und sich von der Richtigkeit der Berechnungen durch einen Nachvollzug mit einem eigenen Rechenprogramm überzeugt. Die HSK hat ergänzend dazu auch weitere Modellberechnungen durchgeführt, um die Robustheit des Tiefenlagersystems zusätzlich zu testen.

Die HSK geht bei ihren Berechnungen sowie bei ihrer Bewertung der Berechnungen der Nagra davon aus, dass die zeitliche und räumliche Homogenität und Konstanz der transportrelevanten Parameter wie Sorptionskoeffizienten, Löslichkeitslimiten oder Wasserfluss im betrachteten Zeitraum weitgehend erhalten bleiben. Die geologischen Untersuchungen weisen darauf hin, dass diese Bedingung erfüllt ist. Auch das im Tiefenlager entstehende Gas führt nach heutigem Wissensstand zu keinen dauernden Beschädigungen des Wirtgesteins und so zu keinen neuen hydraulischen Wegsamkeiten.

Die HSK hat insbesondere Folgendes festgestellt:

- Die Ausbreitungs- und Dosisberechnungen wurden von der Nagra klar dargelegt und dokumentiert.
- Die betrachteten Fälle decken eine weite Spanne möglicher Zustände und Entwicklungen ab. Ungewissheiten werden mit alternativen Modellen und der Variation der transportrelevanten Parameterwerte berücksichtigt.
- Der Referenzfall der Nagra, weitere relevante Fälle und die verwendeten Datensätze wurden von der HSK geprüft und in einzelnen Fällen mit neuen Werten und eigenen Berechnungen ergänzt.

- Das behördlich festgelegte Schutzziel einer jährlichen Individualdosis von 0.1 mSv/Jahr wird in allen betrachteten Fällen um Grössenordnungen unterschritten. Das Mehrfachbarrierensystem erweist sich deshalb als robust innerhalb eines weiten Bereichs der Parameterwahl.
- Die Dosen stammen hauptsächlich von den schwach sorbierenden, gut löslichen und langlebigen Nukliden ^{129}I , ^{36}Cl und $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, in geringerem Masse auch von ^{79}Se , während die Actiniden von der Bentonitverfüllung und vom Opalinuston weitgehend durch Sorption zurückgehalten werden. Aus diesem Grunde unterscheiden sich die im Referenzfall und bei Annahme pessimistischer geochemischer Parameter berechneten Dosen nicht grundlegend (siehe Figur 4.11-2). Die zeitlichen Verläufe der Strahlendosen sind deshalb im Referenzfall der Nagra und im Referenzfall der HSK in sehr guter Näherung identisch.



Figur 4.11-2: Zeitliche Entwicklung der Strahlendosen, berechnet mit den Parameterwerten des Referenzfalls der Nagra (Fall 1.1a) und pessimistischen Annahmen der Nagra (Fall 1.1i) sowie der HSK für die Löslichkeiten und Sorptionskoeffizienten der sicherheitsrelevanten Nuklide. Die maximalen Dosen unterschreiten das behördliche Schutzziel von 0.1 mSv/a um fast drei Grössenordnungen.

- Die Ergebnisse der ergänzenden probabilistischen Berechnungen der Nagra zeigen, dass solche betrachtungen wertvoll sind, wenn viele unabhängige Ungewissheiten der Parameterwerte gleichzeitig zu berücksichtigen sind. Die Stichprobengrösse (Anzahl Parametersätze) ist hier allerdings zu klein, um damit bei der betrachteten Anzahl Parameter den Einfluss auf die errechnete Dosis zuverlässig beurteilen zu können. Das Vorgehen zur Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf das Schutzziel 2 der Richtlinie HSK-R-21 (vgl. Abschnitt 4.1) anhand einer Darstellung der komplementären Verteilungsfunktion

(CCDF) ist nicht korrekt. Für den Entsorgungsnachweis bleibt das ohne Folgen, da die Nagra alle ihre Dosisberechnungen der Prüfung anhand des Schutzziels 1 unterstellt hat.

4.12 Beurteilung des Sicherheitsnachweises

Das Konzept für die Langzeitsicherheit beruht auf folgenden drei Hauptelementen:

- Die radioaktiven Abfälle werden durch Einbringen in ein Tiefenlager vom Lebensraum des Menschen fern gehalten (Isolation).
- Die Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem Tiefenlager wird so lange verhindert, bis die Radioaktivität durch radioaktiven Zerfall stark abgenommen hat (Einschluss).
- Die Freisetzung radioaktiver Stoffe führt zu keinen Aktivitätskonzentrationen in der Biosphäre, die für Mensch und Umwelt schädlich sind (Begrenzung der Freisetzung).

Im vorgelegten Projekt hat die Nagra dieses Sicherheitskonzept ein System von verschiedenartigen, technischen und natürlichen, passiv und gestaffelt wirkenden Barrieren umgesetzt.

- Die radioaktiven Abfälle sind in stabilen Matrizen (Brennstoffmatrix für die abgebrannten Brennelemente (BE), Glasmatrix für die verglasten hochaktiven Abfälle (HAA) und vorwiegend Zementmatrix für die langlebigen mittelaktiven Abfälle (LMA)) eingebunden, die nach Zutritt von Wasser den radioaktiven Inhalt nur sehr langsam freigeben.
- Die BE- und HAA-Abfallgebinde sind in dickwandigen Endlagerbehältern dicht verpackt, die während 10'000 Jahren einen absoluten Einschluss erbringen.
- Die BE- und HAA-Endlagerbehälter sind inmitten einer sehr gering durchlässigen plastischen Bentonitverfüllung gelagert, die zunächst den Zutritt von korrosiven Stoffen zu den Behältern vermindert und später die Freisetzung mobilisierter Radionuklide begrenzt.
- Die Zementverfüllung der LMA-Lagertunnel limitiert ebenfalls die Freisetzung der entsprechenden Radionuklide.
- Das Lager ist in der Mitte der über 100 m mächtigen Opalinustonschicht (Wirtgestein) angelegt. Der sehr gering durchlässige Opalinuston begrenzt zunächst den Wasserzufluss zum Lager. Später verzögert er die Migration von aus dem Lager freigesetzten Radionukliden.
- Die Verfüllung und Versiegelung der Zugänge zum Tiefenlager verhindern, dass die freigesetzten Radionuklide die Migrationsbarriere des Opalinustons umgehen.
- Die Rahmengesteine um die Opalinustonschicht sowie die weiteren darüber liegenden geologischen Schichten schützen das Wirtgestein und das Lager vor natürlichen und menschlichen Einwirkungen von der Erdoberfläche aus.
- Durch die Wahl eines tektonisch stabilen und ruhigen Gebiets bleiben die beschriebenen günstigen Bedingungen über eine Zeit von mindestens einer Million Jahren erhalten.

Die Nagra hat nachvollziehbar aufgezeigt, dass der geforderte langfristige Schutz von Mensch und Umwelt mit dem beschriebenen Lagersystem erbracht werden kann. Die Methodik, die sie zum Nachweis der Langzeitsicherheit angewendet hat, entspricht dem Vor-

gehen, das sich international etabliert hat. Die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse zeigen, dass keine schädlichen radiologischen Auswirkungen aus dem Tiefenlager zu erwarten sind. Die errechnete Strahlendosis bleibt weit unter dem behördlichen Schutzziel von 0.1 mSv pro Jahr. Anhand ihrer eigenen Berechnungen bestätigt die HSK, dass auch unter sehr pessimistischen Annahmen keine Strahlendosis ermittelt wird, die das Schutzziel verletzen würde.

Die gemäss Kernenergiegesetzgebung und der Richtlinie HSK-R-21 geforderte Langzeitsicherheit ist somit erreicht. Nach eingehender Prüfung der vorgelegten Unterlagen kommt die HSK zum Ergebnis, dass der geforderte Sicherheitsnachweis im Rahmen des Entsorgungsnachweises erbracht ist: Die Nagra hat gezeigt, dass im gewählten Wirtgestein Opalinuston mit den aufgrund von Sondierbefunden nachgewiesenen geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften und mit den oben beschriebenen technischen Barrieren die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers gewährleistet ist.

Im Falle der Fortführung des Projekts hinsichtlich Realisierung eines Tiefenlagers sind verschiedene Aspekte eingehender abzuklären. Das betrifft insbesondere folgende Punkte:

- Endlagerbehälter: Die Dichtheitskontrolle am beladenen Behälter, die mechanische Festigkeit der BE-Behälter, die Auswirkungen einer korrosionsbedingten Volumenzunahme sowie die Möglichkeit einer stärkeren Sulfidkorrosion sind weiter zu untersuchen.
- Bentonitverfüllung: Das Verhalten des Bentonits bei hohen Temperaturen, die beim Gasdurchbruch auftretenden Phänomene sowie die Materialeigenschaften des Bentonitgranulats bedürfen weiteren Abklärungen.
- Auswirkungen der Gasproduktion: Die Vorgänge, die zur Produktion von Gas im Tiefenlager, hauptsächlich aber zur Abfuhr des entstehenden Gases durch die Bentonit- bzw. Zementverfüllung und durch den Opalinuston führen, sind eingehender zu untersuchen.

5 Zusammenfassende Beurteilung

5.1 Forderung des Entsorgungsnachweises

Der Bundesbeschluss zum Atomgesetz vom 6. Oktober 1978 legte fest, dass die Rahmenbewilligung für Kernreaktoren nur erteilt wird, wenn die dauernde, sichere Entsorgung und Endlagerung der aus der Anlage stammenden radioaktiven Abfälle gewährleistet ist.

Die Kernkraftwerkbetreiber beauftragten die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) mit der Ausarbeitung des Projekts Gewähr, das den geforderten Nachweis erbringen sollte. Im Januar 1985 reichte die Nagra das Projekt ein. Für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle waren zwei Lager vorgesehen: Ein Lager im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz für die hochaktiven Abfälle und ein Lager im Mergel des Oberbauenstocks (UR) für die schwach- und mittelaktiven Abfälle.

In seiner Entscheidung vom 3. Juni 1988 stellte der Bundesrat fest, dass der geforderte Entsorgungsnachweis für die schwach- und mittelaktiven Abfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung der Kernkraftwerke sowie aus dem Bereich ausserhalb der Kernenergienutzung erbracht wurde. Für die hochaktiven Abfälle und die aus der Wiederaufarbeitung stammenden langlebigen alphahaltigen Abfälle sei der Sicherheitsnachweis erbracht worden. Für diese Abfälle noch nicht erbracht sei der Standortnachweis, d.h. der Nachweis von genügend ausgedehnten Gesteinskörpern mit den erforderlichen Eigenschaften. Aus bautechnischer Sicht stünden keine Bedenken gegen die Erstellung der Lager. Der Bundesrat forderte sodann die Bewilligungsinhaber auf, die Forschungsarbeiten im Hinblick auf die Endlagerung der hochaktiven Abfälle und der langlebigen alphahaltigen Abfälle auf nicht-kristalline Wirtgesteine (Sedimente) auszudehnen und auch andere als die bisher untersuchten Regionen in die Evaluation einzubeziehen.

Inzwischen wurde am 1. Februar 2005 das neue Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003 in Kraft gesetzt, das das Atomgesetz und den diesbezüglichen Bundesbeschluss ablöst. Im KEG Artikel 13 wird weiterhin der Nachweis für die Entsorgung der aus einer Kernanlage anfallenden radioaktiven Abfälle als Voraussetzung für die Erteilung der Rahmenbewilligung gefordert. In den Übergangsbestimmungen (Artikel 106) wird zudem gefordert, dass die Eigentümer der bestehenden Kernkraftwerke den Entsorgungsnachweis innert zehn Jahren erbringen müssen, soweit der Bundesrat diesen Nachweis nicht bereits als erfüllt beurteilt hat.

5.2 Eingereichtes Projekt und Anträge der Nagra

Zur Erfüllung der gesetzlichen Auflage hat die Nagra am 20. Dezember 2002 das Projekt Opalinuston eingereicht. Damit betrachtet sie den Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente (BE), verglaste hochaktive Abfälle (HAA) sowie langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) als erbracht. Das Projekt der Nagra stützt sich hauptsächlich auf erdwissenschaftliche Daten zum Opalinuston im Zürcher Weinland. Es umfasst folgende drei Teilnachweise:

- **Sicherheitsnachweis:** Dieser muss zeigen, dass im gewählten Wirtgestein, mit den aufgrund von Sondierbefunden nachgewiesenen geologischen und hydrogeologischen Ei-

genschaften und mit den technischen Barrieren, die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers gewährleistet ist.

- **Standortnachweis:** Dieser muss aufgrund dokumentierter Untersuchungsergebnisse zeigen, dass ein genügend grosser Wirtgesteinskörper mit den im Sicherheitsnachweis festgehaltenen Eigenschaften existiert, so dass die Realisierung eines Tiefenlagers im besagten Standortgebiet mit guter Aussicht auf Erfolg in Angriff genommen werden könnte.
- **Machbarkeitsnachweis:** Dieser muss zeigen, dass im gewählten Wirtgestein ein Tiefenlager unter Einhaltung der Sicherheitsvorschriften, mit den heute vorhandenen technischen Mitteln gebaut, betrieben und langfristig sicher verschlossen werden kann.

Gestützt auf das eingereichte Projekt stellt die Nagra dem Bundesrat den Antrag, von der Erfüllung der Auflagen zum Projekt Gewähr im zustimmenden Sinne Kenntnis zu nehmen und der Entsorgungsnachweis als erbracht zu genehmigen. Zu diesem Antrag fasst die HSK nachfolgend ihre Beurteilung zusammen.

Die Nagra möchte künftige Untersuchungen in Hinblick auf die geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, verglasten hochaktiven Abfälle sowie langlebigen mittelaktiven Abfälle in der Schweiz auf den Opalinuston und das potentielle Standortgebiet im Zürcher Weinland konzentrieren. Mit dem Einreichen des Entsorgungsnachweises stellte sie dem Bundesrat auch den Antrag, dieser Fokussierung der Untersuchungen zuzustimmen. Zu diesem Antrag hat der Bundesrat am 3. Dezember 2004 im Rahmen der Beantwortung eines parlamentarischen Vorstosses Stellung genommen. Er ist der Meinung, dass im Hinblick auf die Standortwahl für ein geologisches Tiefenlager für hochaktive Abfälle Alternativen zum Zürcher Weinland aufgezeigt werden sollen. Die HSK spricht den zweiten Antrag der Nagra im vorliegenden Gutachten deshalb nicht an.

5.3 Beurteilung des Standortnachweises

Der erdwissenschaftliche Datensatz, mit dem die Nagra den Standortnachweis führt, ist sorgfältig erhoben und ausführlich dokumentiert worden. Er konnte von der HSK nachvollzogen werden. Die Daten beruhen auf Auswertungen, die dem heutigen Stand der Wissenschaft entsprechen. Es ist der Nagra gelungen, den Zustand der Geosphäre im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland genügend detailliert darzulegen und die für die Sicherheitsberechnungen notwendigen erdwissenschaftlichen Daten bereitzustellen. Eingehende Analysen des geologischen Geschehens in der jüngeren Vergangenheit und in der Gegenwart bilden eine solide Basis für die Abschätzung von Zukunftsszenarien.

Im Zürcher Weinland wurde in geeigneter Tiefenlage ein etwa 15 km² ausgedehnter, für die geologische Tiefenlagerung von abgebrannten Brennelementen, verglasten hochaktiven sowie langlebigen mittelaktiven Abfällen geeigneter Gesteinskörper nachgewiesen. Der Platzbedarf für das Tiefenlager beträgt demgegenüber gemäss Referenzfall der Nagra knapp 2 km². Die geologischen Formationen zeichnen sich durch eine ruhige, annähernd horizontale Lagerung aus, bestehend aus wasserdurchlässigen (Aquiferen) und sehr geringdurchlässigen Schichten (Aquitarden). Die vorgefundenen hydraulischen, hydrochemischen und isotopengeochemischen Verhältnisse der Tiefengrundwässer unterstreichen eine ausgeprägte vertikale hydrogeologische Stockwerksgliederung. Zwischen den Aquiferen des

oberen Malms und des Sandsteinkeupers bilden die Schichten des unteren Malms, des Opalinustons, des Lias und des oberen Keupers zusammen ein System von vorwiegend tonig-mergeligen Aquitarden mit einer Gesamtmächtigkeit von rund 270 m.

Das Wirtgestein Opalinuston ist in diesem Bereich rund 110 m mächtig und im regionalen Massstab homogen und einheitlich ausgebildet. Der hohe Gehalt an Tonmineralen und die Dominanz der feinen Korngrößen bewirken eine extrem geringe Wasserdurchlässigkeit des Opalinustons. Hydrochemische und isotopengeochemische Untersuchungen an aus Bohrkernen extrahierten Porenwasserproben zeigen, dass es sich bei den Porenwässern im Opalinuston um schichtgebundenes und geochemisch überprägtes Formationswasser handelt. Dieses Formationswasser blieb über Millionen von Jahren hinweg im Opalinuston eingeschlossen und tauschte nur sehr langsam durch Diffusion mit den umliegenden Schichten aus. Die Zusammensetzung der Porenwässer weist darauf hin, dass die charakteristische Zeit für den diffusiven Austausch zwischen den Porenwässern und den angrenzenden Aquiferen im Bereich von mehreren Hunderttausenden bis Millionen von Jahren liegt. Aus den Resultaten der Nagra zur Hydrogeologie und Hydrochemie ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Eigenschaften des Opalinustons im Zürcher Weinland für die Erbringung und den Nachweis der Langzeitsicherheit geeignet sind. Die langen Verweilzeiten der Porenwässer weisen auf ein hohes Einschlussvermögen des Opalinustons hin.

Die tektonischen Bewegungen der jüngeren Erdgeschichte spielten sich an alten, bereits bestehenden Störungen ab, die reaktiviert wurden. Zukünftige Bewegungen werden sich, solange das heutige Spannungsfeld erhalten bleibt, auch an diesem alten Störungsmuster orientieren. Das Tiefenlager kann mit ausreichendem Abstand zu diesen Störungen angelegt werden. Der Opalinuston selbst enthält nur wenige Deformationsstrukturen, die zudem keine erhöhte Durchlässigkeit aufweisen.

Das Untersuchungsgebiet wird aktuell mit etwa 0.1 mm/Jahr gehoben. Diese Hebungsrate wurde mit mehreren unabhängigen Methoden ermittelt; sie dürfte einen Maximalwert darstellen. Die Ursache dieser Hebung wird von den Experten kontrovers beurteilt. Es herrscht aber Einigkeit, dass die Hebungen im betrachteten Zeitraum von einer Million Jahren anhalten und durch Erosion kompensiert werden. Die Erosion wird das geologische Tiefenlager in diesem Zeitraum nicht beeinträchtigen. Die glaziale Tiefenerosion, als das schwerwiegendste Ereignis, kann die Rahmengesteine in diesem Zeitraum nicht abtragen. Es verbleiben nach einer Million Jahren noch rund 450 m Gesteinsüberdeckung über dem Lager bestehen.

Erdbeben stellen aufgrund bisheriger Erfahrungen aus Untertagebauwerken für geologische Tiefenlager ein geringes Risiko dar. Das Zürcher Weinland ist ein seismisch ruhiges Gebiet. Auch bei grösseren seismischen Ereignissen kann von der Standfestigkeit der Untertagebauten ausgegangen werden. Allfällige Bewegungen an bestehenden Störungen sind unerheblich, da in entsprechenden Stollenabschnitten nicht eingelagert würde.

Im Zürcher Weinland wurden keine bedeutenden Rohstoffvorkommen gefunden. Auch das geothermische Potenzial der tieferen geologischen Schichten fällt im Zürcher Weinland gegenüber anderen Regionen eher bescheiden aus. Nutzungskonflikte des Untergrundes sind deshalb kaum zu erwarten.

Die felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons sind im Zusammenhang mit dem Machbarkeitsnachweis beurteilt. Die HSK erachtet die von der Nagra verwendeten Kennwerte als vernünftig abgesichert. Somit sind alle grundsätzlichen Anforderungen für den Standortnachweis erfüllt, namentlich

- 1) genügende Ausdehnung des Wirtgesteins,
- 2) geringe Durchlässigkeit,
- 3) ruhige Lagerung,
- 4) geeignete felsmechanische Eigenschaften,
- 5) geologische Langzeitstabilität,
- 6) keine Nutzungskonflikte mit Rohstoffen.

Nach eingehender Prüfung der in der Geosynthese der Nagra vorgelegten erdwissenschaftlichen Grundlagen kommt die HSK zum Schluss, dass der Standortnachweis im Rahmen des Entsorgungsnachweises für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle erbracht ist. Die Nagra konnte nachvollziehbar nachweisen, dass im Zürcher Weinland in günstiger Tiefe ein genügend grosser Gesteinsbereich des Opalinustons mit den für die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers erforderlichen Eigenschaften vorliegt.

Im Falle der Fortführung des Projekts hinsichtlich der Realisierung eines Tiefenlagers im Zürcher Weinland sind folgende erdwissenschaftliche Datengrundlagen mittels entsprechender Untersuchungen zu ergänzen und zu verfeinern:

- Die Rahmengesteine ober- und unterhalb des Opalinustons sollen detaillierter charakterisiert werden, damit das Einschlussvermögen dieser Schichten quantifiziert werden kann.
- Der hydrogeologische Datensatz soll erweitert und bestätigt werden und insbesondere auch die Rahmengesteine umfassen.
- Die Vorgänge der glazialen Tiefenerosion sollen eingehender abgeklärt werden, damit die Möglichkeiten der zukünftigen Auswirkungen durch Modellierungen besser eingegrenzt werden können.

5.4 Beurteilung des Machbarkeitsnachweises

Nach Ansicht der HSK ist die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers unter den felsmechanischen Gegebenheiten im Opalinuston des Zürcher Weinlands in der vorgeschlagenen Tiefenlage machbar. Für die Erstellung der Untertagebauwerke liegt heute eine breite Erfahrung aus dem Tunnel- und Bergbau vor. Die HSK sieht aber die nachfolgenden Aspekte betreffend Auslegung des Lagers und Vorgehensweise beim Bau, die eingehender abzuklären sind:

- Zur Erleichterung der Wasserhaltung und der Lüftung wäre es von Vorteil, den Zugangstunnel auf verschiedenen Tiefenlagen mit dem Lüftungs- und Bauschacht zu verbinden.

- Die Tunnel- und Schachtquerschnitte sind auf der Grundlage des benötigten Betriebslichtraumprofils, der Linienführung, der Bauverfahren und der zu erwartenden Konvergenz zu optimieren.
- Es besteht Abklärungsbedarf im Bauverfahren betreffend Zweckmässigkeit des Rasedrill-Verfahrens, Wasserhaltung, Einsatz einer Tunnelbohrmaschine und Ausbruchssicherung.
- Die Auslegung der Lüftung ist insbesondere für die dritte Bauetappe, wenn viel Wärme abzuführen ist, zu optimieren.
- Die Analyse der möglichen untertägigen Gefährdungsereignisse und der zu treffenden Massnahmen sind zu verfeinern.

Die aufgezeigten Abklärungen sind im Falle der Realisierung des Tiefenlagers vorzunehmen und können im Rahmen der nachfolgenden Planungsschritte bearbeitet werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt bedeuten sie keine grundsätzliche Einschränkung der Machbarkeit.

Das von der Nagra vorgelegte Konzept für Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss eines geologischen Tiefenlagers erfüllt nach Ansicht der HSK die gesetzlichen Anforderungen und Vorgaben, wie sie im neuen Kernenergiegesetz und in der zugehörigen Kernenergieverordnung festgehalten sind. Die genauen Arbeitsabläufe des Betriebs, die detaillierte Umsetzung der Überwachungsmassnahmen sowie die Ausführung der Verfüllarbeiten und des endgültigen Verschlusses des Lagers sind im Falle der Realisierung des Projekts im Verlaufe der späteren Bewilligungsverfahren weiter zu konkretisieren. Dabei sind insbesondere die Eigenschaften des Bentonitgranulats durch weitere Untersuchungsergebnisse zu erhärten.

Die Rückholung der eingelagerten Abfallbehälter ist nach Ansicht der HSK grundsätzlich machbar. Eine erleichterte Rückholbarkeit der Abfälle ist dahingehend sichergestellt, dass die Verfüllung und der Verschluss der Gesamtanlage einschliesslich der Zugangsbauwerke schrittweise erfolgt und sich über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten erstreckt. Bis zur letzten Verschlussstufe, der Verfüllung und Versiegelung der Rampe, ist die Zugänglichkeit zu den eingelagerten Abfällen gewährleistet. Im Falle der Realisierung des Projekts ist das Vorgehen zur Rückholung der Abfälle detaillierter zu erarbeiten.

Zusammenfassend kommt die HSK zum Schluss, dass der Machbarkeitsnachweis für das geologische Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlandes für die angegebene Referenztiefe von etwa 650 m erbracht ist.

5.5 Beurteilung des Sicherheitsnachweises

Das Konzept für die Langzeitsicherheit beruht auf folgenden drei Hauptelementen:

- Die radioaktiven Abfälle werden durch Einbringen in ein Tiefenlager vom Lebensraum des Menschen fern gehalten (Isolation).
- Die Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem Tiefenlager wird so lange verhindert, bis die Radioaktivität durch radioaktiven Zerfall stark abgenommen hat (Einschluss).
- Die Freisetzung radioaktiver Stoffe führt zu keinen Aktivitätskonzentrationen in der Biosphäre, die für Mensch und Umwelt schädlich sind (Begrenzung der Freisetzung).

Im vorgelegten Projekt hat die Nagra dieses Sicherheitskonzept durch ein System von verschiedenartigen, technischen und natürlichen, passiv und gestaffelt wirkenden Barrieren umgesetzt.

- Die radioaktiven Abfälle sind in stabilen Matrizen (Brennstoffmatrix für die abgebrannten Brennelemente (BE), Glasmatrix für die verglasten hochaktiven Abfälle (HAA) und vorwiegend Zementmatrix für die langlebigen mittelaktiven Abfälle (LMA)) eingebunden, die nach Zutritt von Wasser den radioaktiven Inhalt nur sehr langsam freigeben.
- Die BE- und HAA-Abfallgebinde sind in dickwandigen Endlagerbehältern dicht verpackt, die während 10'000 Jahren einen absoluten Einschluss erbringen.
- Die BE- und HAA-Endlagerbehälter sind inmitten einer sehr gering durchlässigen plastischen Bentonitverfüllung gelagert, die zunächst den Zutritt von korrosiven Stoffen zu den Behältern vermindert und später die Freisetzung mobilisierter Radionuklide begrenzt.
- Die Zementverfüllung der LMA-Lagertunnel limitiert ebenfalls die Freisetzung der entsprechenden Radionuklide.
- Das Lager ist in der Mitte der über 100 m mächtigen Opalinustonschicht (Wirtgestein) angelegt. Der sehr gering durchlässige Opalinuston begrenzt zunächst den Wasserzufluss zum Lager. Später verzögert er die Migration von aus dem Lager freigesetzten Radionukliden.
- Die Verfüllung und Versiegelung der Zugänge zum Tiefenlager verhindern, dass die freigesetzten Radionuklide die Migrationsbarriere des Opalinustons umgehen.
- Die Rahmengesteine um die Opalinustonschicht sowie die weiteren darüber liegenden geologischen Schichten schützen das Wirtgestein und das Lager vor natürlichen und menschlichen Einwirkungen von der Erdoberfläche aus.
- Durch die Wahl eines tektonisch stabilen und ruhigen Gebiets bleiben die beschriebenen günstigen Bedingungen über eine Zeit von mindestens einer Million Jahren erhalten.

Die Nagra hat nachvollziehbar aufgezeigt, dass der geforderte langfristige Schutz von Mensch und Umwelt mit dem beschriebenen Lagersystem erbracht werden kann. Die Methodik, die sie zum Nachweis der Langzeitsicherheit angewendet hat, entspricht dem Vorgehen, das sich international etabliert hat. Die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse zeigen, dass keine schädlichen radiologischen Auswirkungen aus dem Tiefenlager zu erwarten sind. Die errechnete Strahlendosis bleibt weit unter dem behördlichen Schutzziel von 0.1 mSv pro Jahr. Anhand ihrer eigenen Berechnungen bestätigt die HSK, dass auch unter sehr pessimistischen Annahmen keine Strahlendosis ermittelt wird, die das Schutzziel verletzen würde.

Die gemäss Kernenergiegesetzgebung und der Richtlinie HSK-R-21 geforderte Langzeitsicherheit ist somit erreicht. Nach eingehender Prüfung der vorgelegten Unterlagen kommt die HSK zum Ergebnis, dass der geforderte Sicherheitsnachweis im Rahmen des Entsorgungsnachweises erbracht ist: Die Nagra hat gezeigt, dass im gewählten Wirtgestein Opalinuston, mit den aufgrund von Sondierbefunden nachgewiesenen geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften und mit den oben beschriebenen technischen Barrieren, die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers gewährleistet ist.

Im Falle der Fortführung des Projekts hinsichtlich Realisierung eines Tiefenlagers sind verschiedene Aspekte eingehender abzuklären. Das betrifft insbesondere folgende Punkte:

- Endlagerbehälter: Die Dichtheitskontrolle am beladenen Behälter, die mechanische Festigkeit der BE-Behälter, die Auswirkungen einer korrosionsbedingten Volumenzunahme sowie die Möglichkeit einer stärkeren Sulfidkorrosion sind weiter zu untersuchen.
- Bentonitverfüllung: Das Verhalten des Bentonits bei hohen Temperaturen, die beim Gasdurchbruch auftretenden Phänomene sowie die Materialeigenschaften des Bentonitgranulats bedürfen weiteren Abklärungen.
- Auswirkungen der Gasproduktion: Die Vorgänge, die zur Produktion von Gas im Tiefenlager, hauptsächlich aber zur Abfuhr des entstehenden Gases durch die Bentonit- bzw. Zementverfüllung und durch den Opalinuston führen, sind eingehender zu untersuchen werden.

5.6 Gesamturteil des Entsorgungsnachweises

Der Entsorgungsnachweis besteht aus den drei Teilen Standort-, Machbarkeits- und Sicherheitsnachweis. Wie in den vorangehenden Abschnitten dargelegt, wurde von der Nagra anhand des eingereichten Projekts Opalinuston jeder dieser drei Teilnachweise erbracht. Die HSK hat zu jedem Teilnachweis Aspekte aufgezeigt, die im Hinblick auf die Realisierung eines Tiefenlagers einer eingehenderen Abklärung bedürfen.

Aufgrund der Ergebnisse ihrer Überprüfung kommt die HSK zum Gesamturteil, dass der gesetzlich geforderte Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle erbracht worden ist. Die HSK empfiehlt dem Bundesrat deshalb, dem Antrag der Nagra, von der Erfüllung der Auflagen zum Projekt Gewähr im zustimmenden Sinne Kenntnis zu nehmen und den Entsorgungsnachweis als erbracht zu genehmigen, zuzustimmen.

Für den Fall einer Fortführung des Projekts hat die HSK auf jene Fragen hingewiesen, die im Hinblick auf die Realisierung eines Tiefenlagers im Opalinuston des Zürcher Weinlands vertiefter untersucht werden müssten.

Würenlingen, den 3. August 2005

HAUPTABTEILUNG FÜR DIE
SICHERHEIT DER KERNANLAGEN



U. Schmocker

Direktor

Referenzen:

- Adler M. (2001): Interaction of Claystone and hyperalkaline solutions at 30°C: A combined experimental and modeling study. Dissertation an der Universität Bern.
- AGKN (1996): Schlussbericht der Arbeitsgruppe. Arbeitsgruppe Kristallin Nordschweiz (AGKN).
- Allard B., Eliasson L., Höglund S., Andersson K. (1984): Sorption of Cs, I and Actinides in Concrete Systems. SKB TR-84-15, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Allia V. (1996): Sedimentologie und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons in der Nordschweiz. Dissertation an der Universität Basel.
- Alonso E.E., Alcoverro J. (2003): The FEBEX benchmark test case definition and comparison of different modelling approaches. GeoProc 2003, Stockholm, Sweden, 13-15 October, 79-95.
- Alonso E.E., Alcoverro J. (2005): The FEBEX benchmark test case definition and comparison of different modelling approaches. Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Geo-Systems: Fundamentals, Modelling, Experiments and Applications, O. Stephansson (ed.), page 95, Elsevier.
- Andersson C.-G. (1998): Test manufacturing of copper canisters with cast inserts. Assessment report, SKB TR-98-09, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Andersson C.-G. (2002): Development of fabrication technology for copper canisters with cast inserts. Status report in August 2001, SKB TR-02-07, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Andersson C.-G., Eriksson P., Westman M., Emilsson G. (2004): Canister fabrication, Status Report. SKB TR-04-23, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Andra (2001): Référentiel géologique du site de Meuse/Haute-Marne. Rapp. A RP ADS 99-005 de l'Agence national pour la gestion de déchets radioactifs, Châtenay-Malabry, France.
- Arcos D., Bruno J., Benbow S., Takase H. (2000): Behaviour of bentonite accessory minerals during the thermal stage. SKB TR-00-06, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Bäckblom G., Munier R. (2002): Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden based on case studies and preliminary model results. SKB TR-02-24, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Barnel. N, Lassabatère T., Le Potier C., Sémété P. (2005): Impact of in-situ parameters and boundary conditions on the thermal-hydro-mechanical behaviour of a clay engineered barrier system. Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Geo-Systems: Fundamentals, Modelling, Experiments and Applications, O. Stephansson (ed.), page 311, Elsevier.
- Baur I., Johnson C.A. (2003): Sorption of Selenite and Selenate to Cement Minerals. Environmental Science & Technology 37, 3442-3447.

- Bläsi H.R., Kleboth P., Liniger M. (1999): Sondierbohrung Benken, Bohrstellengeologie (Stratigraphie, Strukturgeologie, Laboranalysen). Nagra Interner Bericht.
- Bock H. (2004): In situ Spannungszustand im Zürcher Weinland – Bewertung und geologische Interpretation der in der Sondierbohrung Benken durchgeführten Untersuchungen. Nagra Interner Bericht.
- Börgesson L., Hernelind J. (1999): Coupled thermo-hydro-mechanical calculations of the water saturation phase of a KBS-3 deposition hole; Influence of hydraulic rock properties on the water saturation phase. Technical Report SKB TR-99-41, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Börgesson L., Johannesson L.-E., Hernelind J. (2003): Earthquake induced rock shear through a deposition hole, Effect on the canister and buffer. Scientific Basis for Nuclear Waste management XXVII, Kalmar, Sweden, 15-18 June 2003.
- BR (1988): Beschluss des Bundesrats zu „Nukleare Entsorgung: Projekt Gewähr, materielle Beurteilung“. 3. Juni 1988.
- BR (2004): Stellungnahme des Bundesrats zum Postulat 04.3365 Fehr Hans-Jürg „Standort Atommüll-Endlager. Varianten evaluieren“, 3. Dezember 2004.
- Bürgin A. (2000): Studie Paläostressfeld Bohrung Benken. Nagra interner Bericht.
- Cederbom C.E., Sinclair H.D., Schlunegger F., Rahn M.K. (2004): Climate-induced rebound and exhumation of the European Alps. *Geology*, 32, 709-712.
- CNWRA (2004): Comments on Selected Sections of Nagra Safety Case Document NTB 02-05 and Supporting Documents – Final Report. Expert Report HSK 35/94, Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, San Antonio, Texas, USA.
- Couture R.A. (1985): Steam rapidly reduces the swelling capacity of bentonite. *Nature* 318, 50-52.
- Croff A.G. (1983): ORIGEN2: A versatile computer code for calculating the nuclide compositions and characteristics of nuclear materials. *Nuclear Technology* 62, 335-352.
- Davies P.B. (1991): Evaluation of the role of threshold pressure in controlling flow of waste-generated gas into bedded salt at the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP). Sandia Report SAND 90-3246. Sandia National Laboratories, Albuquerque NM, USA.
- Dereeper B., Volckaert G. (1999): Large-scale in situ demonstration test for repository sealing in an argillaceous host rock: The RESEAL project. Euradwaste 1999, Radioactive waste management strategies and issues, European Commission, EUR 19143.
- EC (2004): Thematic network on the role of monitoring in a phased approach to geological disposal of radioactive waste. European Commission Report EUR 21025 EN.
- EKRA (2000): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle. Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA), Schlussbericht im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation.
- Elektrowatt (2004). Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers. Ergänzungen zum NTB 02-02, Nagra Interner Bericht.

- Emch+Berger (2005): Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für BE/HAA und LMA und der durch das Lager induzierten Prozesse. Expertenbericht, HSK 35/97, Emch+Berger AG Ingenieure und Planer, Bern.
- ETHZ (2004): Seismic Hazard Assessment of Switzerland, 2004. Swiss Seismological Service, ETH Zürich.
- EVED (1988): Regelung der Berichterstattung über die laufenden Arbeiten der Nagra. 29. Dezember 1988.
- Farouki O.T. (1981): Thermal Properties of Soils. US Army, Cold Regions Research and Engineering Lab (CRREL), Monograph 81-1.
- Ferry C., Lovera P., Poinssot C., Johnson L. (2003): Quantitative Assessment of the Instant Release Fraction (IRF) for Fission Gases and Volatile Elements as a Function of Burnup and Time under Geological Disposal Conditions. Proc. MRS 2003 Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Kalmar, Schweden.
- Fidelibus C., Löw S. (2004): Re-evaluation of selected hydro-mechanical processes in the near field of a potential nuclear waste repository in the Zürcher Weinland, Switzerland. Expert Report, HSK 35/95, ETH Zürich.
- Gatabin C., Imbert C. (1995): Caractérisation macroscopique de pellets hautement compactées d'argile MX80. Note technique SEDS / 95.41, CEA.
- Gautschi A. (1994): Wasserführung des Opalinustons in Tunnels des Faltenjuras. Nagra Interner Bericht.
- Gautschi A. (2001): Hydrogeology of a fractured shale (Opalinus Clay), Implications for deep geological disposal of radioactive wastes. Hydrogeology Journal 9, 97-107.
- Gimmi T., Waber H.N. (2003): Modelling of profiles of stable water isotopes, chloride and chloride isotopes of pore water in argillaceous rocks in the Benken borehole. Nagra Interner Bericht.
- Gray W.J., Thomas L.E. (1994): Initial Results from Dissolution Testing of Various Air-Oxidized Spent Fuels. MRS 1993, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVII, Material Research Society Symposium Proceedings 333, 391-398.
- Gribi P. (2004): Analytical calculations of the Reference Case results for the safety assessment for Project Opalinus Clay. Nagra Interner Bericht.
- Grünthal G., Mayer-Rosa D., Lenhardt W. (1998): Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH Staaten Deutschland, Österreich, Schweizerische Bautechnik 75, Heft 10, Verlag Ernst&Sohn, Berlin.
- Gubler E. (1991): Recent crustal movements in Switzerland – Vertical movements. Chap. 5: Geodynamics. In: Swiss Geodetic Commission (Eds.), Report on the Geodetic activities in the years 1987 to 1991, SGC Report, Zürich.
- Guillaumont R., Fanghänel T., Fuger J., Grenthe I., Neck V., Palmer D.A., Rand M.H. (2003): Update on the Chemical Thermodynamics of Uranium, Neptunium, Plutonium, Americium and Technetium. Elsevier, Amsterdam, 919p.
- Haeberli W. (2004): Eishaus +10⁶a, Zu Klima und Erdoberfläche im Zürcher Weinland während der kommenden Million Jahre. Expertenbericht Universität Zürich, HSK 35/93.

- Harrington J.F., Horseman S.T. (2003): Gas migration in KBS-3 buffer bentonite - Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions. SKB TR-03-02, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Herman O.W., Westfall R.M. (1989): ORIGEN-S, SCALE module to calculate fuel depletion, actinide transmutation, fission product build up and decay, and associated radiation source terms. Oak Ridge National Laboratory, USA.
- Hicks T., Prescott, A. (2000): A Study of Criticality in a Spent Fuel Repository Based on Current Canister Designs. SKI Report 00:13, Statens Kärnkraftinspektion, Stockholm, Schweden.
- Hicks T. (2001): The hydrogeological effects of earthquakes: Implications for groundwater flow in the Opalinus Clay. Nagra Interner Bericht.
- Hildenbrand A., Schlömer S., Krooss B.M., Littke R. (2004): Gas breakthrough experiments on pelitic rocks: comparative study with N₂, CO₂ and CH₄. Geofluids 4, 61-80.
- Hillner E., Franklin D.G., Smee J.D. (1994): The Corrosion of Zircaloy-Clad Fuel Assemblies in a Geological Repository Environment. WAPD-3173, West Mifflin, Pa. Bettis Atomic Power Laboratory, USA.
- Horseman S.T., Harrington J.F., Sellin P. (1999): Gas migration in clay barriers. Engineering Geology 54, 139-149.
- Horseman S.T. (2001): Self-healing of Fractures in Argillaceous Media from the Geomechanical Point of View. NEA/RWM/CLAYCLUB (2001)5.
- Horseman S.T., Harrington J.F. (2002): Laboratory experiments on gas migration in Opalinus Clay samples from the Benken borehole, Switzerland. Nagra Interner Bericht.
- HSK 21/31: Lösung des geosphärischen Ausbreitungsproblems mit der Methode der finiten Elemente, 1988.
- HSK 23/28: Gutachten zum Projekt Gewähr 1985 der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), 1986.
- HSK 23/29: Technischer Bericht zum Gutachten über das Projekt Gewähr 1985, 1987.
- HSK 23/50: Kristallin-I: Korrosion von HAA-Glas und Endlagerbehälter, 2000.
- HSK 23/57: Entsorgungsnachweis für HAA/LMA - Option Endlager im Opalinuston, Beurteilungskonzept für den Standortnachweis, 1999.
- HSK 23/74: Stellungnahme zum Auswahlverfahren Opalinuston im Zürcher Weinland, 2002.
- HSK 35/78: Abfallinventar hochaktiver Abfälle (Projekt Entsorgungsnachweis), 2003.
- HSK 35/80: Projekt Entsorgungsnachweis: Maximale Löslichkeiten im Nahfeld BE/HAA, 2003.
- HSK 35/82: Projekt Entsorgungsnachweis: Sorptionskoeffizienten im Nahfeld BE/HAA (Bentonit), 2004.
- HSK 35/85: Projekt Entsorgungsnachweis: Sorptionskoeffizienten im Fernfeld (Opalinuston), 2004.

- HSK 35/86: Projekt Entsorgungsnachweis: Maximale Löslichkeiten im Nahfeld LMA (Zement), 2004.
- HSK 35/88: Projekt Entsorgungsnachweis: Sorptionskoeffizienten im Nahfeld LMA (Zement), 2004.
- HSK 35/90: Projekt Entsorgungsnachweis: Berechnung von Zerfall und Wärmeleistung von abgebrannten Brennelementen und verglasten HAA, 2004.
- HSK 35/91: Projekt Entsorgungsnachweis: Verifizierung der Resultate des Referenzfalls der Nagra mit den HSK Rechenprogrammen *tube* und *femtrac* für abgebrannte Brennelemente und HAA-Gläser, 2005.
- HSK 35/92: Projekt Entsorgungsnachweis: Verifizierung der Resultate für den Referenzfall der Nagra mit den HSK Rechenprogrammen *tube* und *fremtrac* für langlebige mittelaktive Abfälle, 2005.
- HSK 35/100: Projekt Entsorgungsnachweis: Prüfung ausgewählter Ausbreitungsrechnungen der Nagra, 2005.
- HSK-AN-5262: Entsorgungsnachweis – Etappe auf einem langen Weg, Historischer Abriss der bisherigen Entscheidungen und Tätigkeiten im Hinblick auf die geologische Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle in der Schweiz, 2005.
- HSK-R-04: Aufsichtsverfahren beim Bau von Kernkraftwerken, Projektierung von Bauwerken. Richtlinie für schweizerische Kernanlagen, 1990.
- HSK-R-21: Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Richtlinie für schweizerische Kernanlagen, 1993.
- IAEA (2001): Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste. IAEA-TECDOC-1208, ISSN-1011-4289.
- JNC (2000): H12 Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan. JNC/TN 1410, Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC), Japan.
- Johannesson L.-E., Börgesson L., Sandén T. (1995): Compaction of bentonite blocks – Development of technique for industrial production of blocks which are manageable by man. SKB TR-95-19. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Johnson L.H. (1982): The dissolution of irradiated UO₂ Fuel in Groundwater. Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-6837.
- Johnson L.H. (2004): Nagra comments on SWRI Report commissioned by HSK, 'Comments on selected sections of Nagra safety case documents NTB 02-05 and supporting documents' by V. Jain, G. Cragnolino and D. Dunn, Nagra Interner Bericht.
- Johnston H.M., Wilmot D.J. (1992): Sorption and diffusion studies in cementitious grouts. Waste Management 12, 289-297.
- Jones J., Vahlund F., Kautsky U. (2004): Tensit – a novel probabilistic simulation tool for safety assessments. Test and verifications using biosphere models. Technical Report TR-04-07, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Karland O., Pusch R. (1995): Cementation phenomena of importance for the performance of smectite clay buffers in HLW repositories. Proceedings of the ICEM 5th.

- Kawamura K., Ichikawa Y., Nakano M., Kitayama K., Kawamura H. (1999): Swelling properties of smectite up to 90°C In situ X-ray diffraction experiments and molecular dynamic simulations. *Engineering Geology* 54, 75-79.
- Kempton E.H.K. (1994): Mögliche Erdgas- und Erdölvorkommen nördlich der Lägeren und im Zürcher Weinland, Bestehen Risiken von Nutzungskonflikten? Expertenbericht zuhanden der HSK, (vertraulich).
- Kennedy K., Verfuss F., Plötze M. (2004): Engineered Barrier Emplacement (EB) Experiment in Opalinus Clay: Granular Material Backfill Product Documentation. Mont Terri Project, Technical Note TN 2004-17.
- King F., Ahonen L., Taxén C., Vuorinen U., Werme L. (2001): Copper corrosion under expected conditions in a deep geologic repository. SKB TR-01-23, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- KNE (2005): Projekt Opalinuston Zürcher Weinland der Nagra, Beurteilung der erdwissenschaftlichen Datengrundlagen und der bautechnischen Machbarkeit. Kommission Nukleare Entsorgung (KNE), Expertenbericht zuhanden der HSK, HSK 35/98.
- Kühl H., Johnson L.H., McGinnes D.F. (2003): Critically and canister shielding calculations for spent fuel disposal in a repository in Opalinus Clay. Nagra Interner Bericht.
- Kuhlmann U., Marschall P. (2002): Hydrodynamische Modellierung der Grundwasserzirkulation im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland, Hydraulische Verhältnisse im Umfeld eines potenziellen geologischen Tiefenlagers. Nagra Interner Bericht.
- Kuhlmann U., Marschall P., Kupper T. (2002): OPA-Geosynthese, Hydrodynamische Modellierung der Grundwasserzirkulation im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland – Hydraulische Verhältnisse im Massstab des lokalen hydrogeologischen Modells. Nagra Interner Bericht.
- Lassabatère T., Dridi W., Servant G. (2004): Gas transfer and mechanical incidence on storage barriers. *Applied Clay Science* 26, 511-520.
- Leu W., Greber E., Schegg R. (2001): Basin Modeling NE-Switzerland: Burial, erosion and temperature history of wells Benken, Weiach and Herdern-1. Nagra Interner Bericht.
- LLNL (2001): Shocked and Stressed, Metals Get Stronger. Science and Technology Review, März 2001, Lawrence Livermore National Laboratory, USA.
- Lothenbach B., Ochs M., Wanner H., Yui M. (1999): Thermodynamic Data for the Speciation of Pd, Pb, Sn, Sb, Nb and Bi in Aqueous Solution. Report TN8400 99-011, Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC), Japan.
- Mäder U.K. (ed.) (2003): Effect of high-pH fluids from cement degradation on Opalinus Clay. Nagra Interner Bericht.
- Madsen F.T. (1998): Clay mineralogical investigations related to nuclear waste disposal. *Clay Minerals* 33, 109-129.
- Marschall P., Johnson L., Senger R., Kuhlmann U. (2005): Ergänzende Beiträge zur Gasfreisetzung aus den BE/HAA Lagerstollen eines Tiefenlagers im Opalinuston. Nagra Interner Bericht.
- Marshall T.J., Holmes J.W. (1979): Soil Physics. Cambridge University Press.

- Martín M., Cuevas J., Leguey S. (2000): Diffusion of soluble salts under a temperature gradient after the hydration of compacted bentonite. *Applied Clay Science* **17**, 55-70.
- Mayer G., Siegel P., Schneider J. (2005): Project Opalinus Clay (Entsorgungsnachweis): Benchmark for temperature evolution calculations using a fully independent 3D Mixed Hybrid Finite Elements code and a simplified 1D Finite Volumes code. Nagra Interner Bericht.
- Mayer-Rosa D. (1986): Die aktuelle Erdbebengefährdung der Schweiz. Proceedings Symposium „Erdbeben; Risikoerfassung, Schadenminderung, Hilfe“. Geophysikalische Kommission, Brig.
- Mazurek M. (2001): Sprödstrukturen und potentielle Migrationspfade im Opalinuston und seinen Rahmengesteinen. Nagra Interner Bericht.
- Meunier A., Velde B., Griffault L. (1998): The reactivity of bentonites: a review. An application to clay barrier stability for nuclear waste storage. *Clay Minerals* **33**, 187-196.
- Milnes A.G. (2004): Review comments on Nagra Technical Report NTB 99-08 “Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien” in the context of Project Opalinus Clay Zürcher Weinland. Expert Report, HSK 35/96, GEA Consulting / ETH Zürich.
- Mompeán F.J., Wanner H. (2003): The OECD Nuclear Energy Agency Thermochemical Database Project, *Radiochimica Acta* **91**, 617-621.
- Moroni L.P., Glasser F.P. (1995): Reactions between cement components and U(VI) oxide. *Waste Management* **15**, 243-254.
- Nagra (2003): Projekt Opalinuston, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle. zusammenfassender Überblick, 2. ergänzte Auflage.
- NEA (2000): Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste: An International FEP Database, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- NEA (2000b): Regulatory Reviews of Assessments of Deep Geologic Repositories, Lessons Learnt. OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- NEA (2003): Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- NEA (2004): Die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz. Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlands. OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- NEA (2004b): The handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety – Lessons learnt from the April 2002 Workshop in Paris, France. OECD Publications, Paris.
- NGB 85-01: Nukleare Entsorgung Schweiz - Konzept und Übersicht über das Projekt Gewähr 1985. Nagra, 1985.
- NGB 85-04: Projekt Gewähr 1985, Endlager für hochaktive Abfälle: Das System der Sicherheitsbarrieren. Nagra Projektbericht, 1985.

- NTB 82-06 : Wärmeleitfähigkeit von Bentonit MX80 und von Montigel nach der Heizdrahtmethode. Nagra Technischer Bericht, 1982.
- NTB 84-18: Quelldruck von hochverdichteten Bentoniten. Nagra Technischer Bericht, 1984.
- NTB 84-21: Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. Nagra Technischer Bericht, 1984.
- NTB 84-26: Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit: Risikoanalysen für ein Endlager für hochaktive Abfälle in der Nordschweiz. Nagra Technischer Bericht, 1985.
- NTB 84-31: Behälter aus Stahlguss für die Endlagerung verglaster hoch-radioaktiver Abfälle. Nagra Technischer Bericht, 1985.
- NTB 85-26: Modelling of Solute Transport in the Near Field of a High Level Waste Repository. Nagra Technischer Bericht, 1986.
- NTB 85-36: Gas Migration Through MX-80 Bentonite. Nagra Technischer Bericht, 1985.
- NTB 86-14: Wasseraufnahme und Wasserbewegung in hochverdichtetem Bentonit. Nagra Technischer Bericht, 1986.
- NTB 86-25: Experiments on Container Materials for Swiss High-Level Waste Disposal Projects, Part III. Nagra Technischer Bericht, 1986.
- NTB 88-07: Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Tertiär- und Malm-Aquifere. Nagra Technischer Bericht, 1990.
- NTB 90-12: A Thermodynamic Description of the Evolution of Pore Water Chemistry and Uranium Speciation During the Degradation of Cement. Nagra Technischer Bericht, 1990.
- NTB 90-14: Hydrogeologische Modellierung im Opalinuston und in der Unteren Süsswasser-Molasse der Nordschweiz. Nagra Technischer Bericht, 1993.
- NTB 91-30: Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Buntsandstein-, Perm- und Kristallin-Aquifere. Nagra Technischer Bericht, 1992.
- NTB 92-06: Herstellung von Bentonit-Granulat mit hoher Schüttdichte zur Bohrlochabdichtung. Nagra Technischer Bericht, 1992.
- NTB 92-11: Hochpermeable, zementgebundene Verfüllmörtel für SMA-Endlager. Nagra Technischer Bericht, 1994.
- NTB 92-14: Mechanical Behaviour of High Level Waste Overpacks under Repository Loading and During Welding. Nagra Technischer Bericht, 1994.
- NTB 93-04: TAME - The Terrestrial-Aquatic Model of the Environment: Model Definition. Nagra Technischer Bericht, 1996.
- NTB 93-08: Sorption Data Bases for the Cementitious Near-Field of a L/ILW Repository for Performance Assessment. Nagra Technischer Bericht, 1994.
- NTB 93-13: Scenario Development for Kristallin-I. Nagra Technischer Bericht, 1999.
- NTB 93-22: Kristallin-I, Safety Assessment Report. Nagra Technischer Bericht, 1994.
- NTB 93-33: Wachstum mikrobieller Mischkulturen unter anaeroben alkalischen Bedingungen. Nagra Technischer Bericht, 1993.

- NTB 94-03: Modelling of the Near-Field Chemistry of the SMA Repository at the Wellenberg Site: Application of the Extended Cement Degradation Model. Nagra Technischer Bericht, 1994.
- NTB 96-04: Cementitious Near-Field Sorption Data Base for Performance Assessment of a L/LMA Repository in a Palfris Marl Host Rock. Nagra Technischer Bericht, 1997.
- NTB 96-05: Far-Field Sorption Data Bases for Performance Assessment of a L/ILW Repository in an Undisturbed Palfris Marl Host Rock. Nagra Technischer Bericht, 1997.
- NTB 97-04: Experimental and Theoretical Studies on Alkaline Degradation of Cellulose and its Impact on the Sorption of Radionuclides. Nagra Technischer Bericht, 1998.
- NTB 97-07: Derivation of In Situ Opalinus Clay Porewater Compositions from Experimental and Geochemical Modelling Studies. Nagra Technischer Bericht, 1997, mit Addendum 1998.
- NTB 98-03: Large-scale experiment for water and gas transport in cementitious backfill materials (Phase 1) COLEX I. Nagra Technischer Bericht, 1998.
- NTB 98-04: Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Wellenberg – Etappen auf dem Weg zum Verschluss; präzisierende Darstellung der Kontrollierbarkeit und Rückholbarkeit. Nagra Technischer Bericht, 1998.
- NTB 99-08: Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland. Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 00-01: Sondierbohrung Benken, Untersuchungsbericht. Nagra Technischer Bericht, Textband und Beilagenband, 2001.
- NTB 00-03: 3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland. Nagra Technischer Bericht, 2001.
- NTB 00-04: The Interaction of Radiolysis Products and Canister Corrosion Products and the Implications for Spent Fuel Dissolution and Radionuclide Transport in a Repository for Spent Fuel. Nagra Technischer Bericht, 2000.
- NTB 01-01: Model Radioactive Waste Inventory for Reprocessing Waste and Spent Fuel. Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 01-04: Calculations of the Temperature Evolution of a Repository for Spent Fuel, Vitri-fied High-Level Waste and Intermediate Level Waste in Opalinus Clay. Nagra Technical Report, 2002.
- NTB 01-08: Porewater chemistry in compacted re-saturated MX-80 bentonite: Physico-chemical characterisation and geochemical modelling. Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 02-02: Projekt Opalinuston – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geolo-gischen Tiefenlagers, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 02-03: Projekt Opalinuston – Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungser-gebnisse, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht, 2002.

- NTB 02-05: Project Opalinus Clay – Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report, 2002.
- NTB 02-06: Project Opalinus Clay – Models, Codes and Data for Safety Assessment, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report, 2002.
- NTB 02-07: Partitioning of Radionuclides in Swiss Power Reactor Fuels. Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 02-09: Assessment of Porewater Chemistry in the Bentonite Backfill for the Swiss SF/HLW Repository. Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 02-10: Project Opalinus Clay: Radionuclide concentration limits in the near-field of a repository for spent fuel and vitrified high-level waste. Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 02-11: Canister Options for the Disposal of Spent Fuel. Nagra Technischer Bericht, 2003.
- NTB 02-13: Redox Conditions in the Near Field of a Repository for SF/HLW and ILW in Opalinus Clay. Nagra Technischer Bericht, 2003.
- NTB 02-15: Diffusion of Tritiated Water (HTO) and $^{22}\text{Na}^+$ -ions through Non-degraded Hardened Cement Pastes – II. Modelling Results. Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 02-16: Nagra/PSI Chemical Thermodynamic Data Base 01/01. Nagra Technischer Bericht und ISBN 1-58112-620-4, 2002.
- NTB 02-17: A Comparison of Apparent Diffusion Coefficients Measured in Compacted Kuni-gel V1 Bentonite with those Calculated from Batch Sorption Measurements and $D_e(\text{HTO})$ Data: A Case Study for Cs(I), Ni(II), Sm(III), Am(III), Zr(IV) and Np(V). Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 02-18: Near-Field Sorption Data Bases for Compacted MX-80 Bentonite for Performance Assessment of a High-Level Radioactive Waste Repository in Opalinus Clay Host Rock. Nagra Technischer Bericht, 2003.
- NTB 02-19: Far-Field Sorption Data Bases for Performance Assessment of a High-Level Radioactive Waste Repository in an Undisturbed Opalinus Clay Host Rock. Nagra Technischer Bericht, 2003.
- NTB 02-20: Cementitious Near-Field Sorption Data Base for Performance Assessment of an ILW Repository in Opalinus Clay. Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 02-21: Glass dissolution parameters: Update for Entsorgungsnachweis. Nagra Technischer Bericht, 2003.
- NTB 02-22: Project Opalinus Clay: Radionuclide Concentration Limits in the Cementitious Near-Field of an ILW Repository. Nagra Technischer Bericht, 2003.
- NTB 02-23: Project Opalinus Clay, FEP Management for Safety Assessment, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technischer Bericht, 2002.

- NTB 03-06: Integrated Approach for the Development of Geochemical Databases Used for Safety Assessment. Nagra Technischer Bericht, 2004.
- NTB 03-08: Cellulose Degradation at Alkaline Conditions: Long-Term Experiments at Elevated Temperatures. Nagra Technischer Bericht, 2004.
- NTB 03-09: A Generic Procedure for the Assessment of the Effect of Concrete Admixtures on the Retention Behaviour of Cement for Radionuclides: Concept and Case Studies. Nagra Technischer Bericht, 2004.
- NTB 04-06: Effects of Post-disposal Gas Generation in a Repository for spent Fuel, High-level Waste and Long-lived Intermediate Level Waste. Nagra Technischer Bericht, 2004.
- Nussbaum C., Bossart P. (2004): Compilation of K-values from packer tests in the Mont Terri rock laboratory. Technical Note 2005-10.
- Ochs M., Lothenbach B., Giffaut E. (2002): Uptake of oxo-anions by cements through solid-solution formation: experimental evidence and modelling. *Radiochimica Acta* 90, 639-646.
- ONDRAF/NIRAS (2001): Technical overview of the SAFIR 2 report. Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials, NIROND 2001-05 E.
- Oversby V. (1996): Criticality in a high level waste repository. A review of some important factors and an assessment of the lessons that can be learned from the Oklo reactor. SKB TR 96-07, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Paleoseis (2002): Reconstructing the paleoseismological record in northern Switzerland. Expertenbericht des Instituts für Geophysik der ETH Zürich.
- Paratte J. M. et al. (1996): Laboratory LRS, Elcos – The PSI code system for LWR core analysis, Part II: User's manual for the fuel assembly code BOXER. PSI Bericht No. 96-08, Paul Scherrer Institut, Würenlingen, Schweiz.
- Pavasars I. (1999): Characterisation of Organic Substances in Waste Materials under Alkaline Conditions. Linköping Studies in Arts and Sciences, No. 196 (PhD. thesis), Linköping University, Sweden.
- Pearson F.J. (2002): Benken Reference Water Chemistry. Nagra interner Bericht.
- Pedersen K., Motamedi M., Karnland O., Sandén T. (2000), Mixing and sulfate-reducing activity of bacteria in swelling, compacted bentonite clay under high-level radioactive waste repository conditions. *Journal of Applied Microbiology* 89, 1038-1047.
- Pfiffner O.A., Blum A., Hug R. (2001): Luftbildanalyse neotektonischer Elemente im Zürcher Weinland. Nagra Interner Bericht.
- Poppei J., Mayer G, Croisé J. (2002): OPA/Hydrogeology: Scoping calculations on gas transport processes in the vicinity of a HLW/SF/ILW repository in Opalinus Clay. Nagra Interner Bericht.
- Pusch R. (1999): Mobility and survival of sulphate-reducing bacteria in compacted and fully water saturated bentonite – microstructural aspects. SKB TR-99-30, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.

- Pusch R., Adey R. (1999): Creep in buffer clay. SKB TR-99-32, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Pusch R., Johnson L., Bluemling P. (2002): Performance of strongly compressed MX-80 pellets under repository-like conditions. Proceedings of Workshop on Clay Microstructure and its Importance to Soil Behaviour, Lund, October 15-17.
- Röllin S., Spahiu K., Eklund U.-B. (2001): Determination of dissolution rates of spent fuel in carbonate solution under different redox conditions with a flow-through experiment. Journal of Nuclear Materials 297, 231-243.
- ROWA (1999): Endlager HAA/LMA – Opalinuston Konzeptstudie Anlagen und Betrieb, Technischer Lösungsvorschlag zur Rückholung eingelagerter Brennelement-Behälter. Nagra Interner Bericht.
- Schärli U., Rybach L. (2002): Erstellung einer aktuellen Karte der Temperaturgradienten und des Wärmeflusses der Nordschweiz. Nagra Interner Bericht.
- Schlatter A. (1999): Neotektonische Untersuchungen in der Nordostschweiz: Kinematische Ausgleichung der Landesnivellamentlinien und Übersicht über die Ergebnisse der geodätischen Messungen. Nagra Interner Bericht.
- Schneider J., Gribi P. (2004): Sitzung vom 29.06.04 mit C. Fidelibus zum Thema „Resistor network modelling to calculate water flow rates in the repository considered in Project Entsorgungsnachweis“: Tischvorlage und Kurzprotokoll, Nagra.
- Schwyn B., Wersin P., Berner U., Wieland E., Hummel W., Thoenen T., Neall F., Smith P.A. (2004): Near Field Chemistry of an LMA Repository in Opalinus Clay. Nagra interner Bericht.
- Sellami S., Deichmann N., Fäh D., Giardini D., Wiemer S. (2003): Hazard maps for Switzerland. <http://histserver.ethz.ch/hazard>.
- Shimizu I., Oswa H., Seo T., Yasuie S., Sasaki I. (1996): Earthquake-related ground motion and groundwater pressure change at the Kamaishi Mine. Engineering Geology, Special Publication 1996.
- Sitz P. (2002): Verschlusskonzept Geologisches Tiefenlager Opalinuston. Nagra Interner Bericht.
- SKB (2004): RD&D-Programme 2004, Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, including social science research. SKB TR-04-21, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Smart N.R., Blackwood D.J., Werme L. (2001): The anaerobic corrosion of carbon steel and cast iron in artificial groundwaters. SKB TR-01-22, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Smith P. (2004): Computational tool for the verification of the Gas Model used in the Safety Assessment for Project Opalinus Clay (Entsorgungsnachweis). Nagra Interner Bericht.
- Spahiu K., Eklund U.B., Cui D., Lundstirn M. (2001): The Influence of Nuclear Field Redox Conditions on Spent Fuel Leaching. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXV, Materials Research Society, 633-638.

- Sprysl H., Gribi P. (2000): Mechanische Stabilität der Kanister im Endlager OPA-BE/HAA. Memorandum, Vibro-Consult AG, Brugg, Schweiz.
- Steefel C.I., Lichtner P.C. (1994): Diffusion and Reaction in Rock Matrix Bordering a Hyper-alkaline Fluid-Filled Fracture. *Geochimica Cosmochimica Acta* **58**, 3595-3612.
- Steefel C.I., Lichtner P.C. (1998): Multicomponent Reactive Transport in Discrete Fractures. I: Controls in Reaction Front Geometry. *Journal of Hydrology* **209**, 196-199.
- Stepinski T. (ed.), Wu P., Wennerström E. (2004): Inspection of copper canisters for spent nuclear fuel by means of ultrasound, Phased arrays, ultrasonic imaging and non-linear acoustics. SKB TR-04-24, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Stober I., Villinger E. (1997): Hydraulisches Potential und Durchlässigkeit des höheren Oberjuras und des oberen Muschelkalks unter dem baden-württembergischen Molassebecken. *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg* **37**, 77-96.
- Swift B.T., Hoch A.R., Rodwell W.R. (2001): Modelling gas migration in compacted bentonite: Gambit Club phase 2 final report. Posiva Report 2001-02, Posiva, Finnland.
- Swissnuclear (2005): Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente aus schweizerischen Kernkraftwerken 1996 – 2004. Fachgruppe Kernenergie der Swisselectric, Olten.
- Tanai K., Kanno T., Gallé C. (1997): Experimental study of gas permeabilities and breakthrough pressures in clays. *Material Research Society Symposium Proceedings* **465**, 995-1002.
- Tits J., Jakob A., Wieland E., Spieler P. (2003): Diffusion of tritiated water (HTO) and $^{22}\text{Na}^+$ ions through non-degraded hardened cement pastes. *Journal of Contaminant Hydrology*, **61**, 45-62.
- UKAEA (1995): FISPIN7 – A code for nuclear inventory calculations. UKAEA report ANSWERS/FISPIN 95/2.
- Van Loon L.R., Kopajtic Z. (1991): Complexation of Cu^{2+} , Ni^{2+} and UO_2^{2+} by Radiolytic Degradation Products of Bitumen. *Radiochimica Acta* **54**, 193-199.
- Van Loon L.R., Soler J.M. (2004): Diffusion of HTO, $^{36}\text{Cl}^-$, $^{125}\text{I}^-$ and $^{22}\text{Na}^+$ in Opalinus clay: Effect of confining pressure, sample orientation, sample depth and temperature. PSI Bericht Nr. 04-03, Paul Scherrer Institut, Würenlingen, Schweiz.
- Volckaert G., Bernier F., Dardaine M. (1996): Demonstration of the in situ application of an industrial clay-based backfill material (Bacchus 2). Final report, European Commission, EUR 16860.
- Weber W.J. (1981): Ingrowth of lattice defects in alpha irradiated UO_2 single crystals. *Journal of Nuclear Materials* **98**, 206-215.
- Werme L. (1998): Design premises for canister for spent nuclear fuel. SKB TR-98-08, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Wersin P., Spahi K., Bruno J. (1994): Kinetic modelling of bentonite-canister interaction; Long-term predictions of copper canister corrosion under oxic and anoxic conditions. SKB TR-94-25, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.

- Wetzel A., Allia V. (2000): The significance of hiatus beds in shallow-water mudstones, an example from the middle Jurassic of Switzerland. *Journal of Sedimentary Research* 70, 170-180.
- Wieland E., Tits J., Dobler J.P., Spieler P. (2002): The effect of α -isosaccharinic acid on the stability of and Th(IV) uptake by hardened cement paste. *Radiochimica Acta* 90, 683-688.
- Yu J.-W., Neretnieks I. (1997): Diffusion and sorption properties of radionuclides in compacted bentonite. SKB TR 97-12, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.

Abkürzungen:

BE:	Abgebrannte Brennelemente
BFE:	Bundesamt für Energie
CCDF:	Complementary Cumulative Distribution Function (Komplementäre Verteilungsfunktion)
CSH:	Ca-Silikat-Hydrate
EDTA:	Ethylendiamintetraessigsäure
EDZ:	Excavation Damaged Zone (Auflockerungszone)
EVED:	Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
FEP:	Features, Events and Processes
HAA:	Hochaktive Abfälle
HSK:	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
HTS-Zement:	Haute Teneur en Silice – Zement
IAEA:	Internationale Atomenergieagentur
IRF:	Instant Release Fraction
ISA:	Isosaccharinsäure
KEG:	Kernenergiegesetz
KEV:	Kernenergieverordnung
KNE:	Kommission Nukleare Entsorgung
KSA:	Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen
LMA:	Langlebige mittelaktive Abfälle
MOX:	mixed oxides, Gemisch aus U- und Pu-Oxiden
Nagra:	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioactiver Abfälle
NEA:	Nuklearenergieagentur der OECD
PVC:	Polyvinylchlorid
SED:	Schweizerischer Erdbebendienst
SIA:	Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein
TDB:	Thermodynamic Data Base
TDS:	Total Dissolved Solids